



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**

**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**«Βελτιστοποίηση σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων  
για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με  
χρήση πιλοτικών μονάδων»**

**Διπλωματική Εργασία**

**Μαυρογιάννης Δημήτριος**

Εξεταστική Επιτροπή:

Επίκουρος Καθηγητής: Στεφανάκης Αλέξανδρος (επιβλέπων)

Καθηγήτρια, Αντιπρύτανης: Βενιέρη Δανάη

Αναπληρωτής Καθηγητής: Γιαννής Απόστολος

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν έμπρακτα κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Στεφανάκη Αλέξανδρο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση ενός ενδιαφέροντος και καινοτόμου θέματος, για τον χρόνο που αφιέρωσε για την καθοδήγηση μου, στην αδιάκοπη στήριξη του αλλά και στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης και στη συλλογή εβδομαδιαίου λύματος για την αποτελεσματική και ορθή πραγματοποίηση του πειράματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κύριο Γιαννή Απόστολο και την κυρία Βενιέρη Δανάη, για το χρόνο που διέθεσαν στην αξιολόγηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω, από βάθους καρδιάς, την υπεύθυνη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, κυρία Κουκουράκη Ελισάβετ, για την αδιάκοπη στήριξη της καθόλη τη διαδικασία πραγματοποίησης των πειραματικών μετρήσεων, για την βοήθεια της με εύστοχες συμβουλές και λύσεις σε προβλήματα που προκύπτανε. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τους συμφοιτητές και φίλους Νικολέττα Θεοδωράκη και Ασημακούλα Ιωάννη για την έμμεση και άμεση βοήθεια τους κατά την πραγματοποίηση αλλά και συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αναφερθώ στην πολύτιμη και ουσιαστική στήριξη της οικογένειάς μου, η οποία με την έμμεση και άμεση βοήθεια της καθόρισε τη συνολική μου πορεία στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	6
ABSTRACT .....	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	13
2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ .....	13
2.1.1 ΕΝΝΟΙΕΣ- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ- ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ .....	13
2.1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ .....	14
2.1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	15
2.1.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	17
2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	18
2.2.1 ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	19
2.2.2 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	21
2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ.....	23
2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ .....	23
2.3.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	23
2.3.2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ Ή ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ .....	24
2.3.3 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ.....	25
2.3.4 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ.....	26
2.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ .....	28
2.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ .....	29
2.4.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ (BOD <sub>5</sub> , COD).....	30
2.4.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ.....	30
2.4.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ .....	31
2.4.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TSS) .....	32
2.4.5 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	32
2.4.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ .....	32
2.5 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΘΕΤΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ.....	33
2.6 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	35
3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΑ & ΥΛΙΚΑ .....	35
3.1.1 ΛΥΜΑ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΕΛ ΧΑΝΙΩΝ .....	35
3.1.2 ΧΑΛΙΚΙ .....	37
3.1.3 HDPE .....	38
3.1.4 ΦΥΤΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ .....	39
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	41
3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	41
3.2.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	43
3.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	43
3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	44
3.3.1 ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ BOD <sub>5</sub> .....	45
3.3.2 ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ COD.....	45
3.3.3 ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ TN.....	45
3.3.4 ΟΛΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΤΟC .....	46
3.3.5 ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΑΖΩΤΟ NH <sub>4</sub> -N .....	46
3.3.6 ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ NO <sub>3</sub> -N .....	46
3.3.7 ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ TP .....	47
3.3.8 ΦΩΣΦΟΡΟΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P .....	48
3.3.9 ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ TSS.....	48
3.3.10 pH .....	48
3.3.11 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	50
4.1 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ .....	50
4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΩΝ .....	51
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ .....	53
4.3.1 ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ BOD <sub>5</sub> .....	53
4.3.2 ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ COD.....	56
4.3.3 ΟΛΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΤΟC .....	58
4.3.4 ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ TN.....	60
4.3.5 ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΑΖΩΤΟ NH <sub>4</sub> -N .....	62
4.3.6 ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ NO <sub>3</sub> -N .....	63
4.3.7 ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ TP .....	64
4.3.8 ΦΩΣΦΟΡΙΚΑ PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P .....	66
4.3.9 pH .....	68
4.3.10 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΗΜΟΤΗΤΑ EC .....	69

4.3.11 ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ TSS .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	72
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	72
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	74
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	74
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΟΨΗ ΕΕΛ ΧΑΝΙΩΝ.....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ-ΕΚΡΟΩΝ, ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΕΩΝ ΟΓΚΩΝ, HRT .....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ .....	89

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι (CW) έχουν αναγνωριστεί ως μια βιώσιμη, οικονομική και αποδοτική επιλογή διαχείρισης αστικών λυμάτων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν σε πιλοτική κλίμακα η βελτιστοποίησης των παραμέτρων σχεδιασμού των CW για την επεξεργασία αστικού λύματος που προέρχεται από την ΕΕΛ Χανίων. Στον εξωτερικό χώρο του θερμοκηπίου της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, του Πολυτεχνείου Κρήτης στήθηκαν τρεις τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (VF CWs). Στη μονάδα G (Gravel) χρησιμοποιήθηκε ως πληρωτικό υλικό χαλίκι, ενώ στις μονάδες P (Plastic) και C (Control) χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE. Οι μονάδες G και P φυτεύτηκαν με κοινό καλάμι, ενώ η C παρέμεινε χωρίς βλάστηση.

Τα συστήματα τέθηκαν σε λειτουργία τον μήνα Ιούλιο, ενώ το πείραμα διήρκησε μέχρι τον Δεκέμβριο. Στα συστήματα εφαρμοζόταν λύμα, το οποίο προερχόταν αμέσως μετά το στάδιο της πρωτοβάθμιας καθίζησης και για τους δύο πρώτους μήνες η τροφοδοσία τους ήταν ημερήσια με όγκο 1,5L. Τον Σεπτέμβριο, η τροφοδοσία γινόταν ανά 3 μέρες, αφήνοντας 2 μέρες ανάπαυσης στα συστήματα, ενώ παράλληλα ο όγκος αυξήθηκε στα 5 L. Από τον Οκτώβριο μέχρι τον Δεκέμβριο, ο τρόπος τροφοδοσίας παρέμεινε ίδιος, ανά 3 μέρες, αλλά ο όγκος αυξήθηκε στα 8 L. Οι εβδομαδιαίες πειραματικές αναλύσεις που πραγματοποιούνταν αφορούσαν την εισροή και τις εκροές των συστημάτων, για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης απομάκρυνσης ρύπων.

Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα P εμφάνισε τις μεγαλύτερες μέσες απομακρύνσεις BOD<sub>5</sub>, COD, TN, NH<sub>4</sub>-N ( $82,16 \pm 13,90$  %,  $82,26 \pm 7,39$  %,  $74,89 \pm 16,44$  %,  $76,37 \pm 17,49$  %), ενώ σημαντική μέση απομάκρυνση εμφάνισε και στα TSS ( $83,19 \pm 15,30$  %). Η μονάδα G είχε υψηλότερες μέσες απομακρύνσεις στους TP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P και TSS ( $46,91 \pm 14,43$  %,  $27,70 \pm 19,85$  %,  $86,14 \pm 16,13$  %), ενώ εμφάνισε σημαντικές μέσες απομακρύνσεις BOD<sub>5</sub>, COD, TN και NH<sub>4</sub>-N ( $78,71 \pm 13,36$  %,  $77,84 \pm 15,09$  %,  $69,09 \pm 18,45$  %,  $68,00 \pm 20,09$  %). Η μονάδα C, παρά την απουσία βλάστησης, παρουσίασε την υψηλότερη απόδοση στην μέση απομάκρυνση TOC ( $62,61 \pm 16,46$  %), ενώ παρουσίασε σημαντική απομάκρυνση COD και TSS ( $75,36 \pm 10,82$  %,  $74,11 \pm 19,12$  %). Τέλος, η ηλεκτρική αγωγιμότητα των G,P και C ήταν  $1481 \pm 487$  μS/cm,  $1553 \pm 542$  μS/cm,  $2038 \pm 1446$  μS/cm, ενώ το pH και των τριών μονάδων εμφανίστηκε ελαφρώς αλκαλικό.

## ABSTRACT

Constructed wetlands (CW) have been recognized as a sustainable, economical and efficient option for municipal wastewater management. In the context of this thesis, the optimization of the design parameters of CW for the treatment of municipal wastewater from the wastewater treatment of Chania was studied on a pilot scale. Three constructed wetlands of vertical sub-surface flow (VF CWs) were set up in the outdoor area of the greenhouse of the Faculty of Chemical and Environmental Engineering of the Technical University of Crete. In unit G (Gravel), gravel was used as a substrate, while in units P (Plastic) and C (Control), recycled HDPE plastic was used. Units G and P were planted with common reed *Phragmites Australis*, while C remained unvegetated.

The systems became operational in July and the experiment lasted until December. The systems were watered with municipal wastewater, which came immediately after the primary sedimentation stage and for the first two months the feed was daily with a volume of 1.5 L. In September, the feeding was done every 3 days, leaving 2 days of rest for the systems, while the volume was increased to 5 L. From October to December, the watering mode remained the same, every 3 days, but the volume was increased to 8 L. The weekly experimental analyses carried out were on the inflow and outflow of the systems, for the characterization of pollutant removal efficiency.

More specifically, the P unit showed the highest mean removals of BOD<sub>5</sub>, COD, TN, NH<sub>4</sub>-N ( $82.16 \pm 13.90$  %,  $82.26 \pm 7.39$  %,  $74.89 \pm 16.44$  %,  $76.37 \pm 17.49$  %), while significant mean removals were also observed in TSS ( $83.19 \pm 15.30$  %). Unit G had higher mean removals of TP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P and TSS ( $46.91 \pm 14.43$  %,  $27.70 \pm 19.85$  %,  $86.14 \pm 16.13$  %), and showed significant mean removals of BOD<sub>5</sub>, COD, TN and NH<sub>4</sub>-N ( $78.71 \pm 13.36$  %,  $77.84 \pm 15.09$  %,  $69.09 \pm 18.45$  %,  $68.00 \pm 20.09$  %). Unit C, despite the absence of vegetation, showed the highest performance in mean TOC removal ( $62.61 \pm 16.46$  %), and showed significant COD and TSS removal ( $75.36 \pm 10.82$  %,  $74.11 \pm 19.12$  %). Finally, the Electrical Conductivity of G, P and C were  $1481 \pm 487$  μS/cm,  $1553 \pm 542$  μS/cm,  $2038 \pm 1446$  μS/cm, while the pH of all three units appeared slightly alkaline.

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

**Εικόνα 2.1** Ασφυξία υδρόβιων οργανισμών, λόγω αποξυγόνωσης (<https://ydatinoskosmos.wordpress.gr/>)

**Εικόνα 2.2** Αεροφωτογραφία του Κέντρου Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας (<https://ypodomes>)

**Εικόνα 2.3** Συστήματα βραδείας εφαρμογής (α) επιφανειακή διάθεση, (β) διάθεση με αυλάκια, (γ) διάθεση με καταιονισμό (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)

**Εικόνα 2.4** Συστήματα ταχείας διήθησης (α) διαδικασίες κατά τη διάθεση, (β) στραγγιστικό δίκτυο απόληψης λυμάτων, (γ) φρεάτια απόληψης λυμάτων (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>).

**Εικόνα 2.5** Σύστημα επιφανειακής απορροής (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>).

**Εικόνα 2.6** Σχηματική απεικόνιση συνδυασμού συστήματος δεξαμενών σταθεροποίησης (Παρανυχιανάκης, 2021)

**Εικόνα 2.7** Επιπλέοντα υδροχαρή φυτά (α) υδροχαρείς υάκινθοι, (β) λέμνα, (γ) νούφαρα (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)

**Εικόνα 2.8** Βυθισμένα υδροχαρή φυτά (α) Υδροφίλη, (β) άλγη (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)

**Εικόνα 2.9** Δέλτα Έβρου, ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς υγροβιότοπους στην Ελλάδα (<https://unknowngreece.gr/>).

**Εικόνα 2.10** Λίμνη Βιστωνίδα, φυσικός υγροβιότοπος στην Ξάνθη (<https://www.places.gr/>).

**Εικόνα 2.11** Τεχνητός υγροβιότοπος στην έρημο του Ομάν, ένας από τους μεγαλύτερους στον κόσμο (<https://www.thesourcemagazine.org/expansion-for-omans-flagship-industrial-constructed-wetland/>)

**Εικόνα 2.12** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου επιφανειακής ροής ( Tilley et al. , 2008).

**Εικόνα 2.13** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Stefanakis et al. , 2014).

**Εικόνα 2.14** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου κάθετης υποεπιφανειακής ροής (Stefanakis et al. , 2014).

**Εικόνα 3.1** Αεροφωτογραφία απεικόνισης ΕΕΛ Χανιών, (<https://deyach.gr>).

**Εικόνα 3.2** Χαλίκι διαμέτρου 17-20mm.

**Εικόνα 3.3** Απεικόνιση HX38 Biocarrier, loose recycled HDPE black (αριστερά) και HX25KLL Biocarrier, loose recycled HDPE black (δεξιά).(<https://www.hel-x.eu/>).

**Εικόνα 3.4** Φυτό *Phragmites Australis* (<https://greece.inaturalist.org/>).

**Εικόνα 3.5** Πειραματική διάταξη με τις μονάδες G,P και C (από τα δεξιά προς τα αριστερά).

**Εικόνα 3.6** Απεικόνιση των επιφανειών των υποστρωμάτων των μονάδων G (αριστερά), P (μέση) και C (δεξιά).



**Εικόνα 3.7** Δείγματα μετά την προσθήκη αντιδραστηρίων,, για το προσδιορισμό του  $\text{NH}_4\text{-N}$ , και τον κατάλληλο χρωματισμό τους.

**Εικόνα 3.8** Υπολογισμός pH εκροής, με βύθιση του ηλεκτροδίου.

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 4.1** Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους εισροών.

**Πίνακας 4.2** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{BOD}_5$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.3** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{COD}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.4** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{TOC}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.5** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{TN}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.6** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{NH}_4\text{-N}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.7** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{TP}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

**Πίνακας 4.8** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης τους.

**Πίνακας 4.9** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης pH.

**Πίνακας 4.10** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης EC.

**Πίνακας 4.11** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης TSS και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης τους.

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

**Διάγραμμα 4.1** Μέση εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες G, P και C.

**Διάγραμμα 4.2** Συγκέντρωση  $BOD_5$  εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.3** % Απομάκρυνση  $BOD_5$  των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.4** Συγκέντρωση COD εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.5** % Απομάκρυνση COD των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.6** Συγκέντρωση TOC εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.7** % Απομάκρυνση TOC των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.8** Συγκέντρωση TN εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.9** % Απομάκρυνση TN των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.10** Συγκέντρωση  $NH_4-N$  εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.11** % Απομάκρυνση  $NH_4-N$  των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.12** Συγκέντρωση TP εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.13** % Απομάκρυνση TP των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.14** Συγκέντρωση  $PO_4^{3-}-P$  εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.15** % Απομάκρυνση  $PO_4^{3-}-P$  των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.16** Τιμές pH εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.17** Τιμές EC εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

**Διάγραμμα 4.18** Συγκέντρωση TSS εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που έχει παρατηρηθεί από την ανθρωπότητα είναι η ρύπανση των υδάτων, που έχει ως αποτέλεσμα την εκθετική μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Με την ραγδαία αύξηση των βιομηχανιών, του καταναλωτισμού και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, η αυστηρή νομοθεσία, σε πολλές χώρες, που αφορά την ανεξέλεγκτη διάθεση και την ύπαρξη ορίων για αναδυόμενους ρύπους στα λύματα κρίθηκε αναγκαία, με σκοπό την πρόληψη υποβάθμισης, έλλειψης και ρύπανσης του νερού.

Τα αστικά λύματα είναι η κύρια πηγή ρύπανσης του νερού. Αποτελούνται από στερεά, σύνθετους οργανικούς ρύπους, ενώσεις φωσφόρου, αζώτου κ.α. συστατικά που προκαλούν δυσκολίες στην επεξεργασία. Επίσης, τα αστικά λύματα μπορεί να περιέχουν τοξικές και μη αποικοδομήσιμες ενώσεις και παθογόνους μικροοργανισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να απομακρυνθούν για την αποτροπή πιθανών μολύνσεων και προβλημάτων στην ανθρώπινη υγεία.

Με τη χρήση παραδοσιακών φυσικοχημικών και βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας των λυμάτων, η αντιμετώπιση των παραπάνω ρύπων, στα αστικά λύματα, ήταν και παραμένει σημαντικά αποτελεσματική. Το κόστος, όμως, λειτουργείας και διατήρησης των μονάδων αυτών έχει κριθεί σημαντικά υψηλό, με κύριο πρόβλημα την απαίτηση υψηλών ποσών ενέργειας για τη λειτουργία. Έτσι, η ανάπτυξη εναλλακτικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων απασχόλησε αρκετά, την τελευταία εικοσαετία, την επιστημονική κοινότητα.

Οι Τεχνητοί ή Κατασκευασμένοι Υγροβιότοποι (CWs) θεωρήθηκαν μια σημαντική εναλλακτική λύση στην αποκεντρωμένη επεξεργασία αποβλήτων, κυρίως για το λόγο ότι χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό φυσικών, βιολογικών και χημικών μεθόδων για την απομάκρυνση των ρύπων. Η λειτουργία τους αυτή, καθιστά τους CWs μια σημαντικά οικονομική αλλά και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Έτσι, διάφορες κατηγορίες των συστημάτων αυτών, αναπτύχθηκαν ραγδαία σε πειραματικό βαθμό και εφαρμόστηκαν σε αρκετές χώρες, σε πραγματική κλίμακα για επεξεργασία.

Ένα από τα σημαντικότερα συστήματα CWs, είναι οι Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής (VF CWs), οι οποίοι λόγω της υπερβολικά χαμηλής απαίτησης τους για χώρο και της μικρής απαίτησης για ενέργεια, κρίνονται από τους πιο κατάλληλους. Το υπόστρωμα και η φυτική βλάστηση που αποτελούν έναν VF CW, καταφέρνουν την πραγμάτωση πολύπλοκων διεργασιών, όπως αφαίρεση οργανικών ουσιών, πραγματοποίηση αποτελεσματικής νιτροποίησης αλλά και μερικής απονιτροποίησης κ.α. .

Έχουν μελετηθεί διάφορα είδη φυτικής βλάστησης για τη χρήση τους σε CWs, με το *Phragmites Australis* (κοινό καλάμι) να είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα, λόγω της υψηλής αντοχής του σε ρυπογόνες ουσίες, την υψηλή απαίτησης του για νερό, αλλά και της σημαντικής ανάπτυξης του ριζικού του συστήματος. Όσο αναφορά το υπόστρωμα, το πιο δεδομένο είναι άμμος και χαλίκι διαφόρων διαμέτρων, αλλά για την διατήρηση της βιωσιμότητας και την μείωση εισαγωγής και χρήσης φυσικών υλικών, έχουν γίνει έρευνες τα τελευταία χρόνια για αποδοτική επεξεργασία από εναλλακτικά υποστρώματα.

Έχοντας υπόψη τα προαναφερθέντα προβλήματα, η διπλωματική αυτή έχει ως σκοπό την ανάπτυξη της απόδοσης απομάκρυνσης ρύπων με την χρήση οικονομικότερων και πιο οικολογικών συστημάτων. Το πείραμα, αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων

των τεχνητών υγροβιότοπων, για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Παρατηρείται πειραματικά η αποδοτικότητα της χρήσης φυτικής βλάστησης στους VF CWs, αλλά και η χρήση εναλλακτικού υποστρώματος από ανακυκλωμένο πλαστικό για την απομάκρυνση ρύπων που εντοπίζονται στα αστικά λύματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

#### 2.1.1 ΕΝΝΟΙΕΣ- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ- ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

##### ΕΝΝΟΙΕΣ

- Σε κάθε οικιστική περιοχή γίνεται καθημερινή παραγωγή υγρών, στερεών και αέριων ρύπων. Τα *υγρά απόβλητα*, ορίζονται ως το σύνολο των υγρών απορροών που προέρχονται από οικιακή, εμπορική, γεωργική και βιομηχανική δραστηριότητα, σε συνδυασμό με επιφανειακά νερά και όμβρια ύδατα.
- *Οικιακά απόβλητα*, ορίζονται τα λύματα από περιοχές κατοικίας και προέρχονται κυρίως από ανθρώπινες φυσικές λειτουργίες και εμπορικές δραστηριότητες.
- *Βιομηχανικά υγρά απόβλητα*, ορίζονται τα λύματα που προέρχονται από εγκαταστάσεις και χώρους, που χρησιμοποιούνται για βιομηχανική και εμπορική δραστηριότητα.
- *Όμβρια ύδατα*, χαρακτηρίζονται τα νερά της βροχής, νερά από πλύσιμο δρόμων κτλ.

##### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Για την επεξεργασία των αποβλήτων, με κύριο σκοπό να μην αποτελούν κίνδυνο για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον, τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων κατηγοριοποιούνται σε φυσικά, χημικά και βιολογικά.

- *Φυσικά χαρακτηριστικά* υγρών αποβλήτων είναι η θερμοκρασία, το χρώμα, η θολρότητα, η οσμή, η πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε αιωρούμενα και διαλυμένα στερεά.
- Τα *χημικά χαρακτηριστικά* των υγρών αποβλήτων διακρίνονται σε οργανικά συστατικά και ανόργανα συστατικά.
- *Βιολογικά χαρακτηριστικά* των υγρών αποβλήτων, τα οποία είναι σημαντικό να αναγνωρισθούν και να αντιμετωπισθούν, είναι η μεγάλη ποικιλία διαφορετικών βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών, όπως μύκητες και πρωτόζωα.

##### ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Η ποιοτική σύσταση των αστικών λυμάτων παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες εξαρτώνται από:

- i. Το βιοτικό επίπεδο της εκάστοτε οικιστικής περιοχής
- ii. Την επάρκεια σε νερό στην περιοχή
- iii. Την ποσότητα των εισροών των ομβρίων υδάτων στο δίκτυο αποχέτευσης
- iv. Την απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων στο δίκτυο αποχέτευσης

Οι διακυμάνσεις αυτές συνήθως είναι σχετικά μικρές, έως αμελητέες, και για το λόγω αυτό τα αστικά υγρά απόβλητα θεωρούνται σχεδόν σταθερής ποιότητας ( Τσόγκας, 1998).

Η ποιοτική σύσταση των αστικών αποβλήτων εξαρτάται κυρίως από το είδος, τα χαρακτηριστικά και τον αριθμό των ρύπων που περιέχουν. Στα αστικά υγρά απόβλητα περιέχονται κυρίως συμβατικοί ρύποι, παρά τοξικοί, οι οποίοι περιγράφονται από φυσικοχημικές παραμέτρους και προσδιορίζονται με κατάλληλες εργαστηριακές μεθόδους. Συνήθεις παράμετροι που περιγράφουν τους συμβατικούς ρύπους των αστικών υγρών αποβλήτων είναι:

- i. Το βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>)

- ii. Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)
- iii. Ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- iv. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)
- v. Το ολικό άζωτο (TN)
- vi. Η αμμωνία
- vii. Τα νιτρικά
- viii. Τα νιτρώδη
- ix. Ο ολικός φώσφορος
- x. Το φωσφορικά
- xi. Τα ολικά κολοβακτηρίδια
- xii. Τα χλωριούχα
- xiii. Η αλκαλικότητα

, ενώ ακόμα γίνεται έλεγχος θερμοκρασίας, pH και διαλυμένου οξυγόνου. Παράλληλα, ανάλογα με τον τύπο των υγρών αποβλήτων, γίνεται έλεγχος ειδικότερων παραμέτρων όπως λιπών και ελαίων, χρώματος, αλδεύδων, υδρόθειου, διαφόρων μετάλλων και συγκεκριμένων οργανικών ενώσεων (Κουϊμτζης, 1994).

### 2.1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Οι επιπτώσεις των υγρών αποβλήτων τόσο πριν, όσο και μετά την επεξεργασία και τη διάθεση τους, αποβαίνουν κρίσιμες για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία. Τα υγρά απόβλητα, λόγω του υψηλού φορτίου τους σε θρεπτικά οργανικά συστατικά, με την ανεξέλεγκτη διάθεση τους σε υδάτινους αποδέκτες, καταναλώνουν διαλυμένο οξυγόνο για την αποδόμηση τους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών και άλλων φυσικών προβλημάτων. Κύρια αιτία υποβάθμισης των επιφανειακών νερών στην Ελλάδα οφείλεται στην οργανική ρύπανση (Skoulikidis , 2009).

Σημαντική επίπτωση με την μόλυνση των λυμάτων είναι και η πιθανότητα εμφάνισης μολυσματικών ασθενειών, για τις οποίες είναι υπεύθυνοι ιοί και βακτήρια με υψηλή ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι διαδικασίες επεξεργασίας και αντιμετώπισης φυσικών, χημικών και επιλεγμένων μικροβιολογικών ρύπων είναι ικανοποιητική και επιτυχής, ενώ η απομάκρυνση των ανθρώπινων εντερικών ιών στα λύματα παραμένει μη ικανοποιητική, με λιγότερη προσοχή στις μολύνσεις από ιούς στα ύδατα (Gall et al., 2015 ). Η ικανότητα των ιών να διανύουν μεγαλύτερη απόσταση από τα βακτήρια στο έδαφος και τελικά στην πηγή των υπόγειων υδάτων λόγω του μεγέθους τους και η ικανότητα τους να παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στα ύδατα, καθιστά την απομάκρυνσή τους δύσκολη και αυξάνει τον κίνδυνο λοιμώξεων από τον ιό της γαστρεντερίτιδας ( Schwab, 2007).

Αναφέρεται ότι σε παγκόσμιο επίπεδο το 75% με 80% της ρύπανσης των υδάτων προκαλείται από οικιακά λύματα, ενώ παράλληλα, περίπου το 80% του παγκόσμιου πληθυσμού κινδυνεύει από την ρύπανση των υδάτων. Σημαντική επίπτωση των ρύπων στα

θαλάσσια ύδατα, είναι η θανάτωση ψαριών, μαλακίων και άλλων θαλάσσιων οργανισμών που χρησιμεύουν ως τροφή για τον άνθρωπο. Παράλληλα, αρνητικές επιπτώσεις στη τροφική αλυσίδα και στην υγεία του ανθρώπου συνεπάγονται με την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων από εντομοκτόνα στα ύδατα ( Mehtab, 2017).



**Εικόνα 2.1** Ασφυξία υδρόβιων οργανισμών, λόγω αποξυγόνωσης ([https://ydatinoskosmos.wordpress.gr /](https://ydatinoskosmos.wordpress.gr/))

### 2.1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ανάπτυξη επεξεργασίας λυμάτων ,μέσω των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), είναι σημαντική για τη προστασία του περιβάλλοντος και κατά προέκταση, της δημόσιας υγείας. Έχει ως κύριο σκοπό την βιώσιμη ανάπτυξη μέσω της σωστής επεξεργασίας, πριν την διάθεση σε τελικό αποδέκτη, και της επαναχρησιμοποίησης. Οι τρόποι επεξεργασίας χωρίζονται σε συμβατικούς και σε μη συμβατικούς. Οι συμβατικοί τρόποι επεξεργασίας, βασίζονται σε φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε τρία στάδια κατά την επεξεργασία, τη προεπεξεργασία, τη πρωτοβάθμια, τη δευτεροβάθμια και τη τριτοβάθμια επεξεργασία. Ενώ οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας είναι εξαιρετικά αποδοτικές, παράλληλα πραγματοποιείται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ και το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι αρκετά σημαντικό.





**Εικόνα 2.2** Αεροφωτογραφία του Κέντρου Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας (<https://ypodomes>)

Αντίθετα, οι μη συμβατικοί τρόποι επεξεργασίας των αποβλήτων είναι ευκολότεροι όσο αναφορά τη λειτουργία και το σχεδιασμό τους. Στις μη συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνονται αυτές με ελεύθερη επιφάνεια και υπόγεια ροή, κάθετη και οριζόντια. Λόγω της αυξημένης ανάγκης προστασίας του περιβάλλοντος και ευαισθητοποίησης, όσο αναφορά τη βιώσιμη ανάπτυξη και την χρήση των ΑΠΕ ως τον κύριο παράγοντα ενέργειας, οι μη συμβατικές μέθοδοι φαίνεται ότι θα εφαρμοστούν και θα αναπτυχθούν στο μέλλον σε περισσότερες περιοχές (Makisha, 2016).

#### Προεπεξεργασία

Κατά τη προεπεξεργασία γίνεται απομάκρυνση μεγάλων αντικειμένων, ελαίων, χονδρόκοκκου υλικού για τη προστασία του μηχανολογικού εξοπλισμού στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας των αποβλήτων. Οι κύριες διεργασίες που περιλαμβάνει η προεπεξεργασία, είναι η εσχάρωση, η εξάμμωση και η αμμοσυλλογή.

Σκοπός της εσχάρωσης είναι η απομάκρυνση των ογκωδών στερεών των αποβλήτων με τη χρήση ειδικών σχαρών και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται εξαμμητές και αμμοσυλλέκτης για την απομάκρυνση ανόργανων σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη των 200  $\mu\text{m}$ .

#### Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Στο στάδιο αυτό, γίνεται επεξεργασία των αστικών λυμάτων με φυσική ή χημική μέθοδο, κατά την οποία πραγματοποιείται απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, κατά 50% τουλάχιστον, αλλά και μείωση του  $\text{BOD}_5$ , κατά 20%. Περιλαμβάνει την καθίζηση ή επίπλευση και την κροκίδωση με καθίζηση.

Ο κύριος ρόλος της καθίζησης είναι η μείωση του ρυπαντικού φορτίου ( $\text{BOD}$  &  $\text{TSS}$ ) των αποβλήτων που προορίζονται για τις επόμενες μονάδες βιολογικής επεξεργασίας. Η χημική επεξεργασία με καθίζηση χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση αιωρούμενων και



κολλοειδών στερεών που δεν απομακρύνονται με απλή καθίζηση, ενώ παράλληλα συμβάλει στην μερική απομάκρυνση φωσφόρου.

#### Δευτεροβάθμια ή βιολογική επεξεργασία

Κατά την δευτεροβάθμια επεξεργασία γίνεται απομάκρυνση των οργανικών ουσιών των αποβλήτων με βιολογικές διεργασίες με τη χρήση μικροοργανισμών. Ανάλογα με τους μικροοργανισμούς, που είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση και σταθεροποίηση των οργανικών ουσιών, οι βιολογικές επεξεργασίες διακρίνονται σε αερόβιες, αναερόβιες και αερόβιες-αναερόβιες.

Στην αερόβια επεξεργασία, η οποία γίνεται με παρουσία οξυγόνου, γίνεται αποδόμηση των οργανικών ουσιών. Κατά την αναερόβια επεξεργασία η αποδόμηση των οργανικών ουσιών γίνεται με απουσία οξυγόνου, έχοντας ως κύριο στόχο τη χώνευση της λάσπης. Η μικτή επεξεργασία γίνεται σε μεγάλου βάθους δεξαμενές σταθεροποίησης, όπου στο πάνω στρώμα επικρατούν αερόβιες συνθήκες, ενώ στο κάτω αναερόβιες.

#### 2.1.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «για την επεξεργασία και διάθεση αστικών λυμάτων», η οποία τροποποιήθηκε με την Οδηγία 98/15/ΕΕ, καθορίζει την διαχείριση των αστικών λυμάτων. Στην Ελλάδα η εν λόγω οδηγία έχει ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο με την Κ.Υ.Α. 5673/400/1997 (Φ.Ε.Κ. 192Β/14-3-1997) με τίτλο "Μέτρα και Όροι για την επεξεργασία των Αστικών Λυμάτων".

Η Οδηγία ορίζει την ελάχιστη αναγκαία τεχνική υποδομή σε δίκτυα αποχέτευσης και εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που πρέπει να διαθέτουν οι πόλεις και οι οικισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ανάλογα με τον ισοδύναμο πληθυσμό και τον αποδέκτη των επεξεργασμένων λυμάτων. Διακρίνει τους υδάτινους αποδέκτες στους οποίους καταλήγουν τα αστικά λύματα σε τρεις κατηγορίες: σε κανονικούς, ευαίσθητους και λιγότερο ευαίσθητους. Επίσης καθορίζει τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επεξεργασμένων λυμάτων που πρέπει να επιτυγχάνονται στις εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και παράλληλα προβλέπει συγκεκριμένα χρονικά όρια μέσα στα οποία οι οικισμοί, που εμπίπτουν στις διατάξεις της, οφείλουν να ολοκληρώσουν την απαιτούμενη σε κάθε περίπτωση υποδομή συλλογής, επεξεργασίας και διάθεσης των αστικών τους λυμάτων.

Οι διατάξεις που ορίζουν την απαιτούμενη υποδομή, με βάση τα ανωτέρω κριτήρια (ισοδύναμο πληθυσμό, κατηγορία αποδέκτη), ορίζουν ταυτόχρονα και τις χρονικές προθεσμίες μέσα στις οποίες πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί όλες οι αναγκαίες υποδομές. Σε κάθε περίπτωση, οι καταληκτικές ημερομηνίες ήταν τρεις: τα τέλη των ετών 1998, 2000 και 2005.

Στο πέρας του χρονικού ορίζοντα εφαρμογής της Οδηγίας όλοι οι οικισμοί με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο των 2.000 θα πρέπει να διαθέτουν αποχετευτικό δίκτυο και εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων το αργότερο μέχρι το τέλος του έτους 2005. Ως προς το απαιτούμενο επίπεδο επεξεργασίας η Οδηγία καθορίζει εν γένει ως ελάχιστη την δευτεροβάθμια.

Νομοθετικό πλαίσιο που διέπτετε στην Ελλάδα για:

- i. Την διαχείριση των αστικών λυμάτων
  - Οδηγία 91/271/ΕΟΚ
  - Εναρμόνιση – ΚΥΑ 5673/400/1997 (Β 192) "Μέτρα και Όροι για την επεξεργασία των Αστικών Λυμάτων"
  - ΚΥΑ 19661/1982/1999 (Β 1811) "Τροποποίηση της ΚΥΑ 5673 – Κατάλογος ευαίσθητων περιοχών"
  - ΚΥΑ 48392/939/2002 (Β 405) "Συμπλήρωση του καταλόγου ευαίσθητων περιοχών"
- ii. Την επαναχρησιμοποίηση και διάθεση των υγρών αποβλήτων
  - Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011: "Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις"
  - Εγκύκλιος 145447: Διευκρινίσεις σχετικά με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β'354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις».
  - Εγκύκλιος 1589: Διευκρινίσεις σχετικά με την ορθή εφαρμογή της ΚΥΑ 45116/02-02-2011 (ΦΕΚ Β'354/2011) «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις» μετά την έκδοση του Ν. 4014/2011 (ΦΕΚ 209/21-09-2011)
  - ΚΥΑ 191002/2013: Τροποποίηση της υπ' αριθ. 145116/2011 κοινής υπουργικής απόφασης "Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Β' 354)" και συναφείς διατάξεις
  - Νέα Εγκύκλιος «Διευκρινήσεις για τη διάθεση υγρών αποβλήτων σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες μετά την έκδοση του Ν. 4042/2012»

(<https://ypen.gov.gr>)

## 2.2 ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Ονομάζονται τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες συμβαίνουν στον φυσικό περιβάλλον με την αλληλεπίδραση νερού, εδάφους, ατμόσφαιρας φυτικών και ζωικών οργανισμών για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, όπου οι ταχύτητες συντέλεσης των διεργασιών είναι μεγάλες και πραγματοποιούνται σε διαδοχικές δεξαμενές, οι διεργασίες στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, πραγματοποιούνται σε φυσικούς χρόνους και έχοντας το προνόμιο της παράλληλης πραγμάτωσης διεργασιών (Metcalf et al., 1991; Maynard et al., 1999).

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων κατατάσσονται σύμφωνα με (Metcalf et al., 1991; Τσιχριτζής, 2000) σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- i. Τα συστήματα που βασίζονται στο έδαφος (εδαφικά συστήματα)
- ii. Τα συστήματα διαφόρων τεχνητών λιμνών (ή δεξαμενών σταθεροποίησης) και

- iii. Τα συστήματα υδροχαρών φυτών και τεχνητών ή κατασκευασμένων υγροβιότοπων

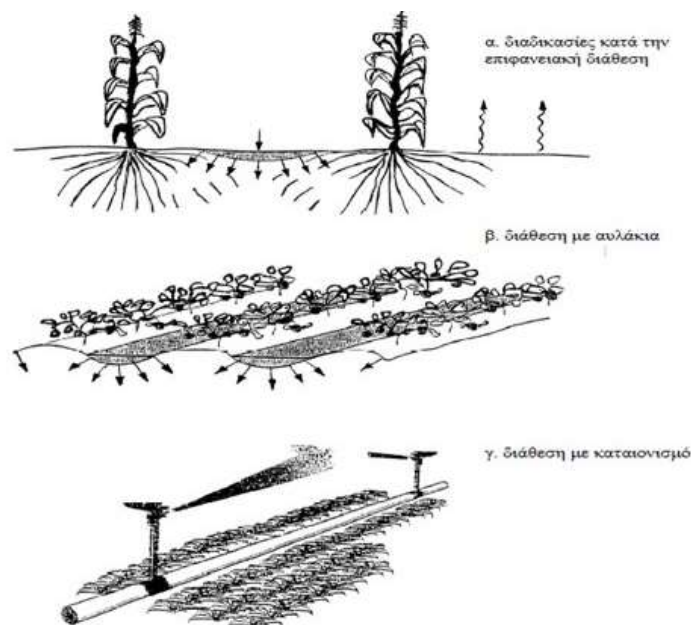
### 2.2.1 ΕΔΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Με τα συστήματα αυτά, γίνεται επεξεργασία και διάθεση των υγρών αποβλήτων στο έδαφος και πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται επιφανειακή ή υπεδάφια διασπορά των λυμάτων σε διαπερατά εδάφη. Οι τύποι των εδαφικών συστημάτων σύμφωνα με (Metcalf et al., 1991) είναι :

- i. Τα συστήματα βραδείας εφαρμογής
- ii. Τα συστήματα ταχείας διήθησης, και
- iii. Τα συστήματα επιφανειακής ροής

#### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΡΑΔΕΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Θεωρούνται τα επικρατέστερα φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, κατά τα οποία πραγματοποιείται ελεγχόμενη εφαρμογή του προεπεξεργασμένου αποβλήτου, σε έδαφος με φυτική βλάστηση, για την ικανοποίηση αρδευτικών και εξατμισοδιαπνευστικών αναγκών και τη περαιτέρω επεξεργασία του αποβλήτου. Το εφαρμοζόμενο απόβλητο είτε καταναλώνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, είτε διηθείται στο έδαφος και κατεισδύει σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995; Παρανυχιανάκης, 2021)



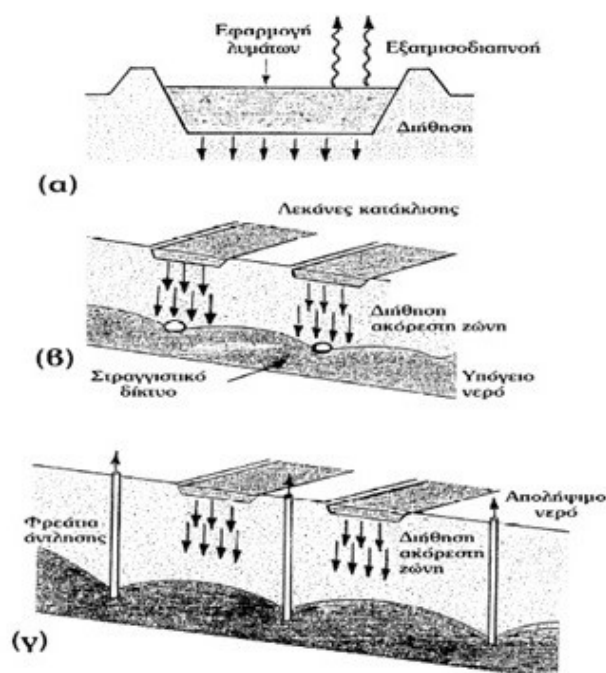
**Εικόνα 2.3** Συστήματα βραδείας εφαρμογής (α) επιφανειακή διάθεση, (β) διάθεση με αυλάκια, (γ) διάθεση με καταιονισμό (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)

#### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΧΕΙΑΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

Συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν, για πάνω από 100 χρόνια, κυρίως στην επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, γνωστά και ως συστήματα επεξεργασίας εφάφους-υδροφορέα. Κατά τη χρήση των συστημάτων αυτών, δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη φυτικής βλάστησης και η εφαρμογή του αποβλήτου γίνεται συνήθως με εκτοξευτές υψηλής

ταχύτητας (Προχάσκα, 2005). Από τους κανονισμούς που έχουν υποβληθεί σε αρκετές χώρες το απόβλητο, το οποίο εφαρμόζεται σε αυτού του είδους τα συστήματα, έχει υψηλές απαιτήσεις σε προεπεξεργασία. Οι κύριοι μηχανισμοί που επικρατούν για την επεξεργασία του αποβλήτου, στα συστήματα ταχείας διήθησης, είναι η φίλτραυση, η προσρόφηση, η ιοντική ανταλλαγή και η μικροβιακή αποδόμηση, καθώς αυτό διηθείται στο έδαφος και κατεισδύει σε βαθύτερα στρώματα (Παρανυχιανάκης, 2021). Τα συστήματα αυτά, σύμφωνα με (Metcalf et al., 1991) περιλαμβάνουν την επεξεργασία με την εξής ακολουθία:

- i. Εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα
- ii. Ανάκτηση με στράγγιση ή άντληση και
- iii. Φυσική ροή του υπόγειου νερού και απόληξη σε επιφανειακή πηγή

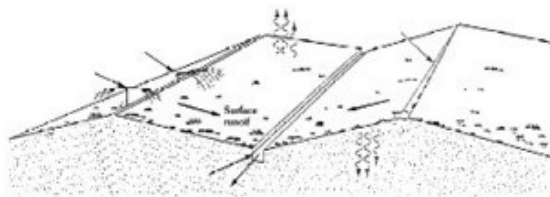


**Εικόνα 2.4** Συστήματα ταχείας διήθησης (α) διαδικασίες κατά τη διάθεση, (β) στραγγιστικό δίκτυο απόληξης λυμάτων, (γ) φρεάτια απόληξης λυμάτων (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>).

#### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Στα συστήματα επιφανειακής ροής το προεπεξεργασμένο υγρό απόβλητο εφαρμόζεται κατά μήκος της υψηλότερης πλευράς μιας κεκλιμένης επιφάνειας με φυτική βλάστηση, κατά την οποία ρέει σε όλη την έκταση της. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ξήρανσης, η διάρκεια των οποίων εξαρτάται από τον σκοπό της επεξεργασίας και την επαναχρησιμοποίηση του υγρού αποβλήτου (Παρανυχιανάκης, 2021). Τα συστήματα αυτά εφαρμόζονται κυρίως σε αδιαπέρατα εδάφη, αλλά λόγω της ικανότητας τους να μειώνουν την περατότητα σε εδάφη που θα εφαρμοστούν, με τη πάροδο του χρόνου, μπορεί να γίνει η εφαρμογή τους και σε εδάφη με υψηλές τιμές διαπερατότητας (Smith and Schroeder, 1985). Η διανομή του αποβλήτου, στα συστήματα επιφανειακής ροής, πραγματοποιείται με εκτοξευτές χαμηλής ή υψηλής πίεσης ή με επιφανειακές μεθόδους και η συλλογή του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου γίνεται

στο τέλος της κλίσης της επιφάνειας (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995; Προχάσκα, 2005).



Εικόνα 2.5 Σύστημα επιφανειακής απορροής (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>).

### 2.2.2 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι δεξαμενές σταθεροποίησης, μετά τα εδαφικά συστήματα, είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Είναι μεγάλες χωμάτινες λεκάνες, στις οποίες εφαρμόζονται και παραμένουν τα απόβλητα για 10-100 ημέρες, ώστε να απομακρυνθούν η οργανική ύλη, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα θρεπτικά στοιχεία. Ανάλογα με το βάθος τους και τις βιολογικές διεργασίες τους ταξινομούνται στους παρακάτω τρεις τύπους: αναερόβιες δεξαμενές, επαναφορτιζόμενες δεξαμενές και δεξαμενές ωρίμανσης. Οι δεξαμενές αυτές σύμφωνα με Shilton (2003) και Mara (2005) είναι αναερόβιες, αερόβιες ή αποτελούνται ταυτόχρονα από αναερόβιες και αερόβιες ζώνες. Ένα τυπικό σύστημα δεξαμενών σταθεροποίησης αποτελείται και από τους τρεις τύπους δεξαμενών σε σειρά, δηλαδή μια αναερόβια, στη συνέχεια μια επαναφορτιζόμενη και τέλος μία ή περισσότερες δεξαμενές ωρίμανσης (Παρανυχιανάκης, 2021).

#### ΑΝΑΕΡΟΒΙΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

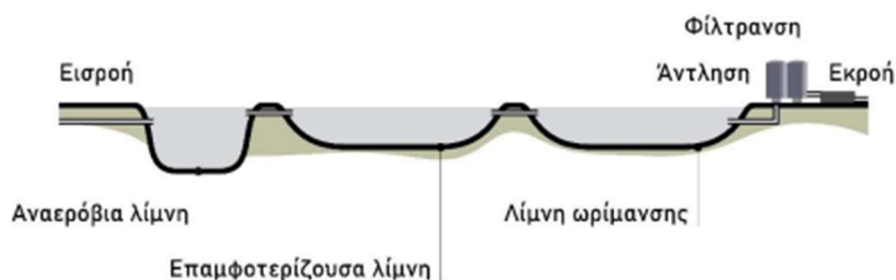
Οι αναερόβιες δεξαμενές έχουν βάθος 2.5 με 5m, μικρό χρόνο παραμονής των λυμάτων (1-3 ημέρες) και μικρή επιφάνεια σε σχέση με τον συνολικό τους όγκο. Η εισροή των λυμάτων γίνεται από τον πυθμένα τους και οι κύριες λειτουργίες τους, είναι η απομάκρυνση της οργανικής ύλης μέσω της καθίζησης στο πυθμένα της δεξαμενής και η οξείδωση του οργανικού φορτίου με τη βοήθεια αναερόβιων μικροοργανισμών. Η κάλυψη της δεξαμενής γίνεται είτε με φυσικό τρόπο, από λίπη και έλαια που περιέχονται στο απόβλητο, είτε με τεχνητό τρόπο με πλαστικές μεμβράνες και άλλα υλικά (Παρανυχιανάκης, 2021). Η λειτουργία μιας αναερόβιας δεξαμενής είναι αποτελεσματική σε θερμοκρασία  $>15^{\circ}$  και  $pH >6$ , έτσι σε θερμά κλίματα σε ένα σύστημα δεξαμενών σταθεροποίησης, η αναερόβια δεξαμενή μπορεί να μειώσει σημαντικά την απαιτούμενη έκταση για επεξεργασία οικιακών λυμάτων. Αντίθετα, σε ψυχρά κλίματα, η απόδοση των αναερόβιων δεξαμενών μειώνεται σημαντικά (Mara, 1997; Paradoroulos et al., 2003).

#### ΕΠΑΜΦΟΤΕΡΙΖΟΥΣΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

Οι επαμφοτερίζουσες δεξαμενές έχουν βάθος 1 με 2m και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις πρωτοβάθμιες στις οποίες εφαρμόζονται ανεπεξεργαστα υγρά απόβλητα και τις δευτεροβάθμιες, οι οποίες δέχονται προεπεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Η κύρια λειτουργία τους, είναι η οξείδωση της οργανικής ύλης, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται η ανάπτυξη υγιούς πληθυσμού αλγών, τα οποία βοηθούν στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου με οξυγόνο που παράγεται μέσω της φωτοσύνθεσης (Παρανυχιανάκης, 2021).

### ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ

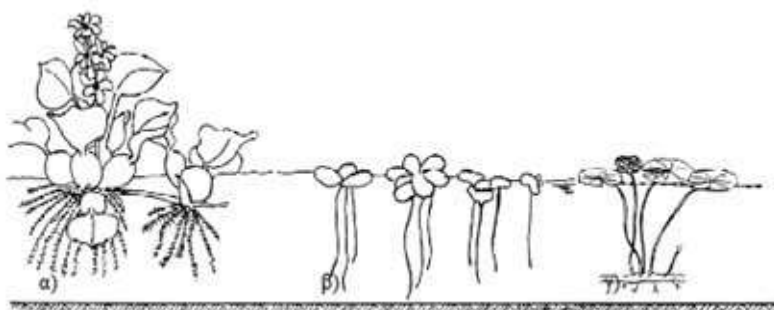
Οι δεξαμενές ωρίμανσης έχουν βάθος 1 με 1.5m και το μήκος είναι συνήθως ανάλογο του βάθους (1:10) για την επίτευξη ευνοϊκών υδραυλικών συνθηκών. Οι κύριοι στόχοι της λειτουργίας μια δεξαμενής ωρίμανσης είναι, η περαιτέρω μείωση του οργανικού φορτίου, από την εκροή της επαμφοτερίζουσας δεξαμενής, η απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών και η σημαντική μείωση θρεπτικών στοιχείων, όπως αμμωνιακού αζώτου και φωσφόρου. Οι κύριοι παράγοντες απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών είναι: (α) ο χρόνος παραμονής, (β) η θερμοκρασία, (γ) το υψηλό pH(>9), (δ) η υπεριώδεις ηλιακή ακτινοβολία και (στ) η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (Mara et al., 1992; Παρανυχιανάκης, 2021).



**Εικόνα 2.6** Σχηματική απεικόνιση συνδυασμού συστήματος δεξαμενών σταθεροποίησης (Παρανυχιανάκης, 2021)

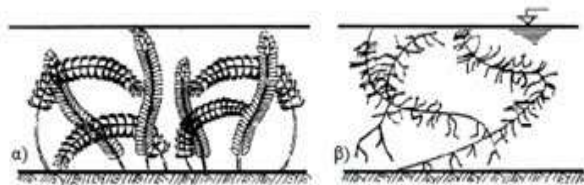
### 2.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΧΑΡΩΝ ΦΥΤΩΝ

Τα συστήματα υδροχαρών φυτών μοιάζουν με τα συστήματα των υγροβιότοπων ελεύθερης επιφάνειας, αλλά διαφέρουν στη φυτική βλάστηση που χρησιμοποιείται. Στα συστήματα αυτά, χρησιμοποιούνται επιπλέοντα είδη (υάκινθοι, νούφαρα, κτλ.), των οποίων τα φύλλα καλύπτουν την επιφάνεια του υγρού, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η ανάπτυξη αλγών. Το ριζικό σύστημα των φυτών, δημιουργεί ένα υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, οι οποίοι βοηθάνε στη περεταίρω αποικοδόμηση των ρύπων που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. Το βάθος των συγκεκριμένων δεξαμενών είναι 0.5 έως 1.8m και συνήθως εφαρμόζεται επιπλέον αερισμός, για τη διατήρηση αερόβιων συνθηκών, την αύξηση της ικανότητας επεξεργασίας και του βιολογικού ελέγχου ανάπτυξης κουνουπιών (Παρανυχιανάκης, 2021).



**Εικόνα 2.7** Επιπλέοντα υδροχαρή φυτά (α) υδροχαρείς υάκινθοι, (β) λέμνα, (γ) νούφαρα (<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)





**Εικόνα 2.8** Βυθισμένα υδροχαρή φυτά (α) Υδροφίλη, (β) άλγη  
(<https://sites.google.com/site/civilsorras/>)

#### 2.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

Ένα φυσικό ή κατασκευασμένο προηγμένο οικολογικό σύστημα, με σκοπό την επεξεργασία διαφόρων υγρών αποβλήτων, χωρίς επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, αφού εφαρμόζει βιογεωχημικές διεργασίες (Mudulia & Ray, 2021).

(Αναλυτικότερα στο επόμενο Κεφάλαιο 2.3)

### 2.3 ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

#### 2.3.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Οι υγροβιότοποι είναι συστήματα μικρού βάθους (<0.6m), τα οποία κατακλύζονται από νερό. Ειδικότερα, ως υγροβιότοποι ορίζονται οι περιοχές των οποίων τα εδάφη βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού από τον υπόγειο υδροφόρα, είτε είναι πλημμυρισμένα από επιφανειακά νερά, με αποτελέσματα να υπάρχει βλάστηση προσαρμοσμένη σε υγρές συνθήκες και παράλληλα να πραγματοποιούνται σε αυτές τις περιοχές διάφορες βιολογικές διεργασίες. Στα συστήματα αυτά αναπτύσσονται δένδρωδη, θαμνώδη ή ποώδη φυτά, όπως: (α) της οικογένειας Cyperaceae, κυρίως του γένους *Carex* Spp. (είδη κύπερης) και των γενών *Typha* (ψαθί), όπως τα *Typha Angustifolia* και *Typha Latifolia*, (β) *Scirpus* (βούρλα), με κυριότερα τα *Scirpus Lacustris* και *Scirpus Validus* και (γ) *Phragmites* (καλάμι), με κυριότερα τα *Phragmites Australis* και *Phragmites Communis* (Αγγελάκης και Τσομπάνογλου, 1995; Παρανυχιανάκης, 2021).

Με τη Διεθνή Συνθήκη Ραμσάρ, η οποία υπεγράφη το 1971, οι υγροβιότοποι χαρακτηρίστηκαν ως εξαιρετικά ευπαθή οικοσυστήματα. Κύριοι στόχοι της συνθήκης, για τη προστασία των υγροβιότοπων, είναι η διατήρηση της ποικιλομορφίας του φυσικού περιβάλλοντος με τη προστασία των διαφόρων οικοσυστημάτων, η διαφύλαξη της χλωρίδας και της πανίδας, η προστασία της βιοποικιλότητας και η προφύλαξη της αλληλεπίδρασης των οικοσυστημάτων (Σιούτη, 2018).

Στους φυσικούς υγροβιότοπους οι σημαντικότερες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι η καθίζηση και η διήθηση, ενώ παράλληλα πραγματοποιούνται χημικές διεργασίες όπως η καταβύθιση και η προσρόφηση, καθώς και βιοχημικές διεργασίες όπως η μικροβιακή αποδόμηση και η πρόσληψη από τη στήλη ύδατος και τη ζώνη ριζών (Midhun et al., 2016). Έτσι, προσφέρουν σημαντικά οφέλη όπως: (α) εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρα, (β) αποθήκευση και απελευθέρωση θερμότητας, (γ) απορρόφηση CO<sub>2</sub>, (δ) έλεγχο πλημμυρικών συμβάντων κ.α. (Stefanakis et al., 2014).



**Εικόνα 2.9** Δέλτα Έβρου, ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς υγροβιότοπους στην Ελλάδα (<https://unknowngreece.gr/>).



**Εικόνα 2.10** Λίμνη Βιστωνίδα, φυσικός υγροβιότοπος στην Ξάνθη (<https://www.places.gr/>).

### 2.3.2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ Ή ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Η δημιουργία των τεχνητών υγροβιότοπων βασίστηκε στην παρατήρηση των πολλαπλών διεργασιών που συμβαίνουν στους φυσικούς υγροβιότοπους, των οποίων οι αποδόσεις ως προς την αφαίρεση ρύπων ήταν πολύ υψηλές, μέσα σε περιβαλλοντικά ελεγχόμενες συνθήκες. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται σε αποκεντρωτικό πρότυπο, κατά την εφαρμογή των φυσικών μεθόδων επεξεργασίας, κάτι που τους διαφοροποιεί από τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας και ενισχύει την βιωσιμότητα, αφού η επεξεργασία των αποβλήτων πραγματοποιείται με οικονομικότερο, περιβαλλοντικά φιλικότερο και ενεργειακά αποδοτικότερο τρόπο (Stefanakis et al., 2014).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να επεξεργαστούν το νερό για μία συγκεκριμένη επόμενη χρήση, π.χ. οικιακή, βιομηχανική, άρδευση αστικού πρασίνου ή καλλιέργειών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση χρήσιμων ουσιών και την περαιτέρω χρήση τους. Έχουν την ικανότητα να παγιδεύουν επικίνδυνες, τοξικές ή ανθεκτικές ουσίες, αυξάνοντας έτσι τις πιθανές χρήσεις του επεξεργασμένου νερού με παράλληλο έλεγχο της εξάπλωσης επιβλαβών ουσιών σε όλο τον πλανήτη. Τέλος, είναι παραγωγικά συστήματα



από μόνα τους, που παράγουν βιομάζα, παρέχοντας οργανική ύλη (ειδικά υγροβιότοποι που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία ιλύος), παρέχουν ψύξη μέσω εξατμισοδιαπνοής, παροχή οικοτόπων κ.λπ. ( Langergraber G. et al., 2019).

Η κατηγοριοποίηση των τεχνητών υγροβιότοπων γίνεται συνήθως με βάση την παρουσία νερού στην επιφάνεια (ροή νερού ελεύθερης επιφάνειας) ή την υποεπιφανειακή ροή. Στην υποεπιφανειακή ροή, εντάσσονται δυο κατηγορίες με βάση την κατεύθυνση ροής των υδάτων, δηλαδή κάθετη ή οριζόντια. Επίσης, υπάρχουν τα υβριδικά συστήματα που είναι ο συνδυασμός του κατακόρυφου και του οριζοντίου τύπου υγροβιότοπων (Stefanakis et al., 2014; Vymazal, 2007).



**Εικόνα 2.11** Τεχνητός υγροβιότοπος στην έρημο του Ομάν, ένας από τους μεγαλύτερους στον κόσμο (<https://www.thesourcemagazine.org/expansion-for-omans-flagship-constructed-wetland/>)

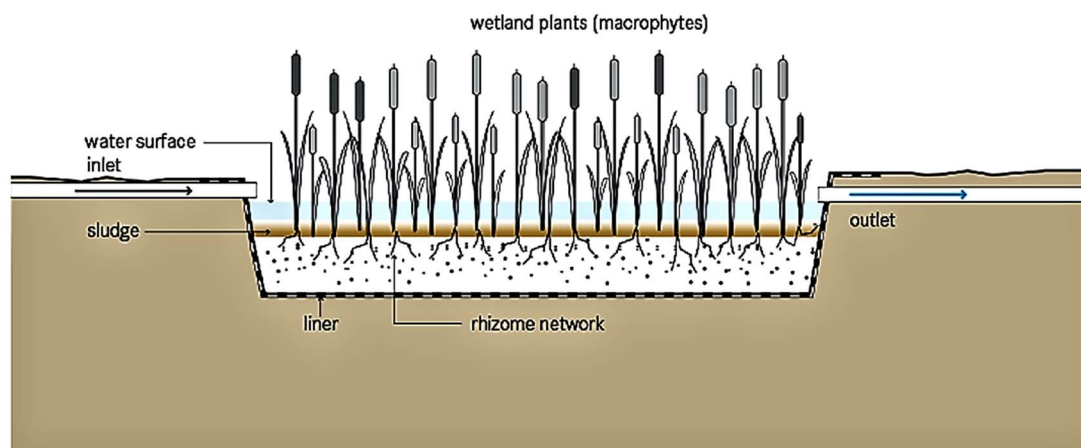
### 2.3.3 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Ένας τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής, ή αλλιώς FWS CW (Free Water Surface Constructed Wetland) είναι μια ρηχή λεκάνη ή κανάλι που περιέχει ένα στρώμα εδάφους πάχους 30-40cm, στο οποίο τοποθετείται και η φυτική βλάστηση. Ο πυθμένας της λεκάνης καλύπτεται από γεωύφασμα ή αργιλώδες υλικό για την αποφυγή διαρροής λυμάτων στα υπόγεια ύδατα. Το νερό εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και την ηλιακή ακτινοβολία, αφού εισέρχεται από μια στήλη νερού βάθους 10-50cm, πάνω από το στρώμα εδάφους και η στάθμη του νερού ρυθμίζεται από την έξοδο του συστήματος. Στα συστήματα αυτά το νερό ρέει οριζόντια μέσω των εδαφικών κόκκων και του ριζικού συστήματος του φυτού και έρχεται σε επαφή με το ανώτερο στρώμα του εδάφους και το ίδιο το φυτό, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την πραγμάτωση διαφόρων φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών για την απομάκρυνση ρύπων (Stefanakis, 2018).

Η απόδοση των FWS CWs είναι σημαντική στην αφαίρεση αιωρούμενων στερεών (SS), βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνου ( $BOD_5$ ). Επίσης προσφέρει ικανοποιητική απομάκρυνση αζώτου (N) και παθογόνων μικροοργανισμών, ενώ παρέχει μικρή απομάκρυνση φωσφόρου (P). Τα παραπάνω, έχουν ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται, οι FWS CWs, κυρίως για την επεξεργασία πρωτοβάθμιων και δευτεροβάθμιων αστικών λυμάτων, ομβρίων υδάτων και

γεωργικών λυμάτων (Kadlec et al., 2009; Vymazal, 2007; Kotti et al., 2010; Vymazal, 2013; Stefanakis et al., 2014).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής τείνουν να μοιάζουν με φυσικούς υγροβιότοπους, λόγω της ελεύθερης επιφάνειας νερού, ενώ σημαντικά μειονεκτήματά τους, είναι ότι έχουν μεγάλες χωρικές απαιτήσεις, σε σύγκριση με άλλους τύπους υγροβιότοπων, για τα ίδια χαρακτηριστικά λύματος, αλλά και η πιθανή εμφάνιση κουνουπιών, λόγω στάσιμων νερών (Stefanakis, 2020).



**Εικόνα 2.12** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου επιφανειακής ροής ( Tilley et al. , 2008).

#### 2.3.4 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής, είναι η κατηγορία των υγροβιότοπων, όπου η ροή των υδάτων πραγματοποιείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και ανάλογα τη κατεύθυνση ροής του νερού, χωρίζεται σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας ή HSF CWs (Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands) και κατακόρυφης ροής ή VF CWs (Vertical Flow Constructed Wetlands).

##### ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ

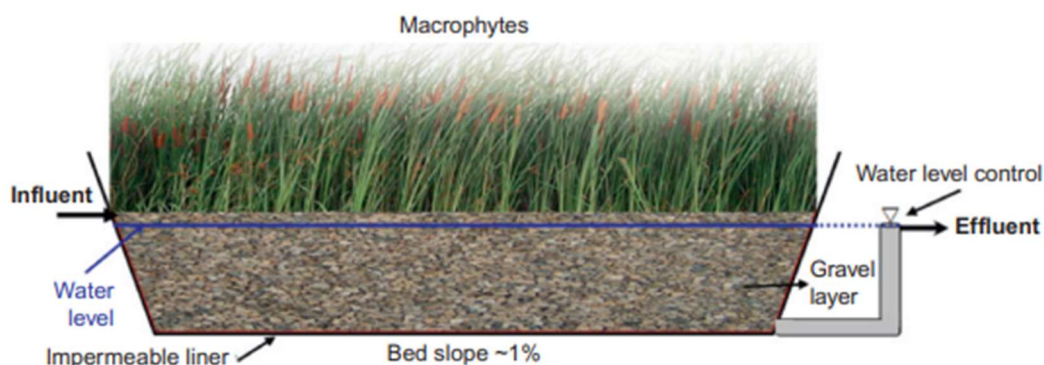
Οι HSF CW είναι κλίνες με χαλίκι ή μείγμα άμμου με χαλίκι, βάθους 30-80cm, συνήθως φυτεμένες με κοινά καλάμια, ενώ ο πυθμένας τους καλύπτεται από αδιαπέραστη γεωμεμβράνη (Vymazal et al., 2006; Akratos and Tsihrantzis, 2007; Kadlec and Wallace, 2009). Συνήθως στα συστήματα HSF CWs εφαρμόζεται μια μικρή κλίση 1-3%, με σκοπό την προώθηση της βαρυντικής ροής του νερού, ενώ παράλληλα, με τη ρύθμιση της εξόδου του νερού, ρυθμίζεται και η στάθμη του μέσα στη κλίνη, η οποία βρίσκεται 5-15cm κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος ( Vymazal et al. , 2006). Επίσης σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματικότητα ενός HSF CW αποτελεί και η ομοιόμορφη κατανομή της εισροής του αποβλήτου μέσα στις κλίνες, κάτι που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός διάτρητου σωλήνα κατά μήκος του πλάτους της κλίνης, εξασφαλίζοντας έτσι την κάλυψη όλης της επιφάνειας και συνθήκες βραδείας ροής (Akratos and Tsihrantzis, 2007; Stefanakis et al. , 2014).

Η επεξεργασία και ο καθαρισμός των λυμάτων από τους HFCWs επιτυγχάνεται με διάφορους μηχανισμούς, όπως καθίζηση, διήθηση, κατακρήμνιση, ανταλλαγή ιόντων, προσρόφηση και μέσω πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ της βλάστησης, των υποστρωμάτων και των σχετικών μικροβίων που αναπτύσσονται, με αποτέλεσμα να

χρησιμοποιούνται για λόγους αποτελεσματικότητας και οικονομίας, σε όλο τον κόσμο (Vymazal, 2009; Choudhary et al. , 2011; Du et al. , 2016). Ως εκ τούτου, οι υγροβιότοποι αυτοί έχουν εφαρμοστεί και για την επεξεργασία λυμάτων βιομηχανιών, όπως γαλακτοκομείων, χοιροστασίων, ελαιοτριβείων, στραγγισμάτων ΧΥΤΑ κ.α. (Santos et al. , 2012; Stefanakis et al. , 2013)

Η διαφορά τους με τους FWS CW είναι ότι η επιφάνεια του νερού δεν είναι εκτεθειμένη στην ατμόσφαιρα και την ηλιακή ακτινοβολία, κάτι που μειώνει σημαντικά τον επικινδυνότητα στους βιότοπους, στην πανίδα και στον άνθρωπο, ενώ παράλληλα μειώνεται ο κίνδυνος ανάπτυξης κουνουπιών. Ωστόσο, ενώ οι HSF CWs απαιτούν μικρότερη έκταση, για μια αποτελεσματική επεξεργασία αποβλήτων, το κόστος επένδυσης είναι μεγαλύτερο (Kadlec and Wallace, 2009; Stefanakis et al. , 2014).

Σημαντικό, τέλος, πλεονέκτημα ενός HSF CW, αποτελεί η ανάπτυξη βιοφίλμ, λόγω της παρουσίας των ριζών και του πορώδους μέσου, το οποίο συντελεί στην δραστικότερη απομάκρυνση οργανικής ύλης και αιωρούμενων στερεών (SS) (Akratos and Tsihrintzis, 2007; Kadlec and Wallace, 2009; Gikas and Tsihrintzis, 2010; Stefanakis et al., 2014).



**Εικόνα 2.13** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (Stefanakis et al. , 2014).

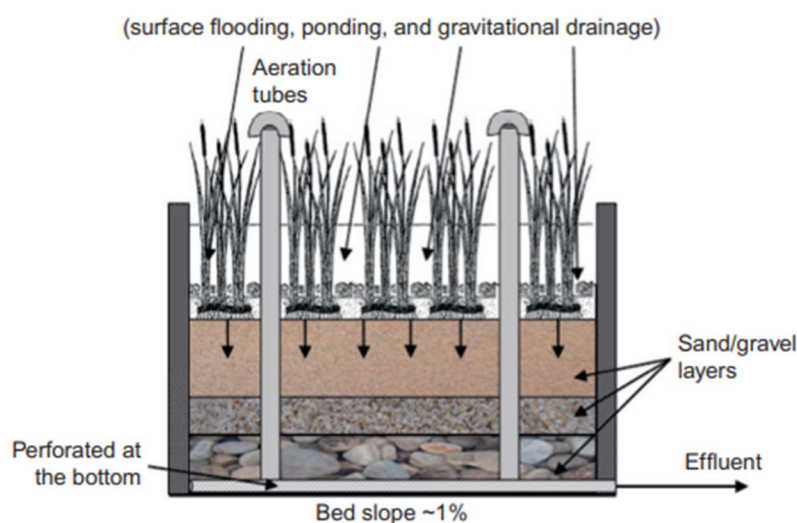
#### ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης ροής ή VF CWs, δεν εφαρμόστηκαν σε μεγάλο βαθμό, κατά τις αρχικές εφαρμογές των τεχνητών υγροβιότοπων, επειδή διαθέτουν υψηλό κόστος λειτουργίας. Είναι, συνήθως, κλίνες στις οποίες τοποθετούνται, ανάλογα το βάθος, διαβαθμισμένα στρώματα χαλικιού και άμμου. Το βάθος των κλινών κυμαίνεται από 0,45 έως 1,20 m και ο πυθμένας της κλίνης έχει κλίση 1-2%, για τη διασφάλιση της ροής του επεξεργασμένου νερού. Όπως και στους HSF CWs, ο πυθμένας τους καλύπτεται με μια γεωμεμβράνη ή κατασκευάζεται από σκυρόδεμα για την αποφυγή διαρροής, και η πιο κοινή βλάστηση που εφαρμόζεται είναι το κοινό καλάμι (*Phragmites Australis*) (Vymazal et al., 2006; Stefanakis & Tsihrintzis, 2009; Stefanakis & Tsihrintzis, 2012; Stefanakis et al., 2014).

Σε ένα VF CW, τα υγρά απόβλητα εφαρμόζονται σε μεγάλες ποσότητες στην επιφάνεια της κλίνης με αρκετά μεγάλη ταχύτητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία λιμναζόντων υδάτων για μικρό χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της βαρύτητας πραγματοποιείται διήθηση και αποστράγγιση μέσω του πορώδους μέσου, του λύματος, ενώ παράλληλα απεγκλωβίζεται ο υπάρχον αέρας και προσφέρεται φρέσκος στη κλίση. Με τη διαδικασία

αυτή ενισχύεται φυσικά ο αέρας στο σύστημα, ενώ μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με την εφαρμογή σωλήνων αερισμού στον πυθμένα της κλίνης. Η αερόβιος συνθήκες, στο εσωτερικό της κλίνης, συντελούν στον αποτελεσματική νιτροποίηση και την διάσπαση οργανικής ύλης (Vymazal, 2007; Kadlec and Wallace, 2009; Stefanakis and Tsihrintzis, 2009; Stefanakis and Tsihrintzis, 2012; Stefanakis, 2020).

Οι VFCWs, έχουν αναπτυχθεί την τελευταία εικοσαετία, και έχουν κυρίως χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία αστικών και οικιακών λύματα. Σημαντική επίσης είναι η χρήση τους, λόγω της αυξημένης τους ικανότητας για νιτροποίηση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων διαφορετικής προέλευσης όπως, βιομηχανικά, αγροτικά και στραγγίσματα από ΧΥΤΑ (Kadlec and Wallace, 2009; Stefanakis et al. , 2014; Sultana et al. , 2015; Wu et al. ,2015)



**Εικόνα 2.14** Σχηματική απεικόνιση τεχνητού υγροβιότοπου κάθετης υποεπιφανειακής ροής (Stefanakis et al. , 2014).

#### ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα υβριδικά συστήματα είναι συνδυασμός διαφόρων τύπων υγροβιότοπων και κυρίως VF CWs και HSF CWs, για την βελτιστοποίηση της απόδοσης της επεξεργασίας. Δεδομένου ότι οι VF CWs είναι αερόβιο συστήματα, η διαδικασία απονιτροποίησης συνήθως δεν ευνοείται, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η συνολική απομάκρυνση αζώτου (Nivala et al. , 2019), ενώ παράλληλα και η απομάκρυνση του φωσφόρου (P) είναι περιορισμένη, επειδή ο χρόνος επαφής μεταξύ του πορώδους μέσου και των λυμάτων, χαρακτηρίζεται ανεπαρκής (Stefanakis and Tsihrintzis, 2012). Ως εκ τούτου, για την ενίσχυση της απομάκρυνσης των νιτρικών, χρησιμοποιούνται τα υβριδικά συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων, με κύριο σκοπό την προώθηση της απονιτροποίησης (Pan et al. , 2012).

#### 2.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι, τα τελευταία χρόνια, αποτελούν μια από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Nivala et al. , 2019). Με την ανάπτυξη τους, χαρακτηρίστηκαν ως μια σημαντική βιώσιμη τεχνολογία με ισχυρές επιδόσεις, ενώ παράλληλα, λόγω ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας και απουσίας χημικών ουσιών για την επεξεργασία, τη λειτουργία και τη συντήρηση, θεωρείται ένα οικονομικό σύστημα με πολύ χαμηλές λειτουργικές δαπάνες (Cao et al. , 2021).

Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται, σύμφωνα με (Stefanakis et al. ,2014), κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τους:

- Δεν είναι απαραίτητη η χρήση μηχανικού εξοπλισμού, όσο αναφορά τις υποδομές τους.
- Έχουν αρκετά χαμηλό κόστος παραγωγής και συντήρησης, και σχεδόν μηδαμινό κόστος λειτουργίας.
- Εγγυάται σημαντική απόδοση, έχοντας μεγάλη ανθεκτικότητα σε υψηλές διακυμάνσεις εισροής, με συνεχή εκροή υψηλής ποιότητας, με πιθανότητα εμφάνισης μικρών διακυμάνσεων με την μεταβολή της θερμοκρασίας στο περιβάλλον.
- Όσο αναφορά τις πρώτες ύλες, η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται από σχεδόν αποκλειστική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενώ, παράλληλα καταναλώνει χαμηλά ποσοστά ενέργειας.
- Διαθέτουν μεγάλη διάρκεια ζωής, πάνω από 30 έτη, ενώ και η λειτουργία τους είναι αυτόνομη, με ανάγκη μόνο για περιοδικό έλεγχο.
- Δεν υπάρχει απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους
- Με εξαίρεση κάποιες περιπτώσεις τεχνητών υδροβιότοπων επιφανειακής ροής, στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, δεν υπάρχει παραγωγή οσμών.
- Έχουν σημαντική ανθεκτικότητα ρε ορισμένα τοξικά συστατικά, και μηδενική παραγωγή παραπροϊόντων.
- Παρέχεται η ικανότητα λειτουργίας των συστημάτων, πέρα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, αλλά και ως χώροι δημιουργίας διαφόρων βιοτόπων, εγκαταστάσεις αναψυχής, εκπαιδευτικές εγκαταστάσεις, περιοχές μηχανικού τοπίου, οικολογικής τέχνης και αστικά καταφύγια άγριας ζωής (Stefanakis, 2019).

#### 2.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

Η απομάκρυνση των ρύπων που εισέρχονται σε ένα υδροβιότοπο, πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς μηχανισμών και φυσικών, χημικών, και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν μέσα στις κλίνες. Οι διεργασίες αυτές, συμβαίνουν ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων των στοιχείων του συστήματος και συμβαίνουν ανεξάρτητα, η μια από την άλλη, αλλά δρουν συνεργατικά στην επεξεργασία του λύματος. Κάποιοι σημαντικοί ενδεικτικοί μηχανισμοί που πραγματοποιούνται είναι: (α) διήθηση, καθίζηση και κατακράτηση μεγαλύτερων στερεών στο πορώδες του υποστρώματος, (β) ανάπτυξη βιοφίλμ στην επιφάνεια των κόκκων του μέσου και στο ριζικό σύστημα του φυτού, επιτρέποντας μικροβιακή δραστηριότητα, (γ) πρόσληψη διαφόρων ρύπων και νερού από τα φυτά, για την ανάπτυξη τους, (δ) προσρόφηση στην επιφάνεια των κόκκων του μέσου, διαφόρων συστατικών, (στ) εξάλειψη παθογόνων μικροοργανισμών, λόγω παρατεταμένου χρόνου παραμονής του λύματος στις κλίνες, αλλά και λόγω έκθεση των ρίζων σε υπερϊώδη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την παραγωγή αντιβιοτικών κ.α. (Stefanakis et al. , 2014).



Οι τεχνητοί υγροβιότοποι θεωρούνται ευρέως ως ανθεκτικά συστήματα ικανά να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές διαταραχές (Zhao et al. , 2022). Όμως, παράγοντες όπως ο τύπος ενός τεχνητού υγροβιότοπου, οι κλιματολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του λύματος που εφαρμόζεται για επεξεργασία, εμφανίζουν διάφορους παραμέτρους, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψιν, αφού επηρεάζουν τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα και κατ' επέκταση την απομάκρυνση των ρύπων στα συστήματα. Ο **υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)**, είναι από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους και χαρακτηρίζει το χρονικό διάστημα που το λύμα παραμένει και αλληλοεπιδρά με τα στοιχεία που βρίσκονται μέσα στον υγροβιότοπο. Επίσης, σημαντική παράμετρος χαρακτηρίζεται και η **φυτική βλάστηση** που χρησιμοποιείται, αφού για την αποδοτική απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών και φιλτραρίσματος, είναι απαραίτητη η υψηλή παραγωγή φυτικής βιομάζας και πυκνού ριζικού συστήματος. Το **πληρωτικό μέσο** που θα εφαρμοστεί με σκοπό το φιλτράρισμα, ανάλογα τις ιδιότητες που διαθέτει, επηρεάζει τις διεργασίες επεξεργασίας. Τέλος, οι πιθανές διακυμάνσεις **pH** και **θερμοκρασίας**, μπορούν να επηρεάσουν διάφορες μικροβιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα (Stefanakis et al. , 2014).

Έτσι, η απόδοση ενός συστήματος τεχνητού υγροβιότοπου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση που βρίσκεται το σύστημα, το πληρωτικό μέσο, ο χρόνος παραμονής των λυμάτων, η υδραυλική κλίση, η μετεωρολογική παράμετρος, ο ρυθμός και η κατεύθυνση ροής των λυμάτων, το βάθος του νερού, οι τρόποι τροφοδοσίας, τα είδη φυτικής βλάστησης, η μικροβιακή ανάπτυξη κ.α.. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται, εξαρτώμενο από τους παραπάνω παράγοντες, διάφορους ρύπους όπως BOD, COD, ολικό άζωτο (TN), ολικό φώσφορο (TP), TSS, TDS, βαρέα μέταλλα, μικροβιακή κοινότητα κ. λπ. (Stefanakis et al. , 2014; Abou-Elala et al. , 2017; Shukla et al. , 2021; Ji et al. , 2022).

#### 2.4.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ (BOD<sub>5</sub>, COD)

Η οργανική ύλη αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ρύπους, κυρίως στα αστικά λύματα και εκφράζεται από το βιοαποικοδομήσιμο μέρος (BOD<sub>5</sub>) και την ολική οργανική ύλη (COD) (Stefanakis et al. , 2014). Έχει διαπιστωθεί ότι οι υγρότοποι είναι κατάλληλοι στην απομάκρυνση της οργανικής ύλης, δηλαδή του BOD<sub>5</sub> και του COD (Swarnakar et al. , 2022).

Με τη διαδικασία της καθίζησης, κατά την οποία τα σωματίδια εναποτίθενται στο πυθμένα της δεξαμενής, λόγω της βαρύτητας, αλλά και της φυσικής διήθησης, όχι μόνο μειώνεται σημαντικά η σωματιδιακή οργανική ύλη στο λύμα, αλλά εξαλείφονται και τα κολοβακτηρίδια, τόσο αερόβια όσο και αναερόβια (García et al. , 2010; Dotro et al., 2015). Επίσης, κατά τη φωτοσύνθεση των μακρόφυτων παράγεται οργανική ύλη, η οποία λειτουργεί ως πηγή ενέργειας για ετερότροφη δραστηριότητα μικροοργανισμών και μυκήτων, η οποία έχει σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση BOD και COD, καθώς είναι η βάση μετασχηματισμού και αποσύνθεσης οργανικής ύλης και άλλων σύνθετων ρύπων (Kadlec and Wallace, 2009). Αντίθετα παρατηρήθηκε ότι το pH, που επικρατεί σε ένα σύστημα, δεν έχει σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση BOD (Paing et al., 2015).

#### 2.4.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ

Στα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων η απομάκρυνση του ολικού αζώτου δεν είναι αρκετά αποτελεσματική, με εύρος μεταξύ 40 έως 55%, με αποτέλεσμα να χρειάζονται

τεχνικές βελτίωσης για την επίλυσή τους (Vymazal, 2007). Θεωρείται μια αρκετά δύσκολη διαδικασία, η οποία συνήθως περιλαμβάνει νιτροποίηση-απονιτροποίηση, πρόσληψη αζώτου από τα φυτά, προσρόφηση από το εδαφικό υπόστρωμα, εκπομπή  $N_2O$  και εξατμισοδιαπνοή (Huang et al. , 2017; Liu et al. , 2019).

Η παρουσία οξυγόνου είναι σημαντικός παράγοντας για την οργανική αποικοδόμηση, με σκοπό την αερόβια νιτροποίηση, αλλά λόγω της έλλειψης διαλυμένου οξυγόνου στα συστήματα, δεν είναι αποτελεσματική η απομάκρυνση αζώτου (Fan et al. , 2013b; Hu et al. , 2012). Για την αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου, και κατά συνέπεια τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης του αζώτου, έχουν γίνει έρευνες ανάπτυξης προηγμένων συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων, όπως τεχνητός αερισμός, τεχνητοί υδροβιότοποι με παλιρροϊκή ροή κ.α. ( Li et al. , 2014; Pan et al. , 2015; Wu et al. , 2015).

Η διαδικασία νιτροποίησης-απονιτροποίησης, θεωρείται ο κυριότερος τρόπος απομάκρυνσης του αζώτου αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 50% της συνολικής απομάκρυνσης (Uusheimo et al. , 2018; Liu et al. , 2019). Οι VF CWs έχουν αρκετά καλή ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου , κάτι που ευνοεί στην ανάπτυξη αερόβιων βακτηρίων, όπως τα νιτροποιητικά βακτήρια , αλλά για τη διαδικασία απονιτροποίησης χρειάζεται ένα αναερόβιο περιβάλλον, συνθήκες που προσφέρουν οι HSF CWs( Liu et al., 2019 ).

Μεγάλη επίδραση, στην απομάκρυνση του αζώτου, έχουν περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το pH, τη θερμοκρασία, το είδος της φυτικής βλάστησης αλλά και λειτουργικοί παράγοντες όπως ο λόγος C/N, ο τρόπος εφαρμογής της εισροής, το διάστημα μεσολάβησης μεταξύ των τροφοδοσιών, ο τύπος των υδροβιότοπων και η ποσότητα της εισροής (Du et al. , 2018; Yu et al. , 2019).

#### 2.4.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου, σε συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση με μειώσεις του που κυμαίνονται από 25% έως 48% (Vymazal, 2007; Toscano et al. , 2015 ). Η απομάκρυνση του, οφείλεται κυρίως: (α) στην καθίζηση ως αδιάλυτες ενώσεις, (β) στην προσρόφηση στο μέσο των κλινών και στο εδαφικό υπόστρωμα και (γ) στην απορρόφηση από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς (Vymazal, 2007).

Με τους τεχνητούς υδροβιότοπους, σύμφωνα με (Ji et al. , 2020), οι οδοί απομάκρυνσης του P, όπως και του N, αποδίδονται κυρίως στη συνεργική διαδικασία των παραπάνω μηχανισμών, οι οποίοι συχνά επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί αρκετά επιβλαβείς για τους φυτικούς ιστούς, με αποτέλεσμα να επηρεάσει τη φυσιολογική δραστηριότητα των φυτών, όπως η αφομοίωση των θρεπτικών συστατικών P, έχοντας ως συνέπεια τη μείωση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας (Wei et al. , 2017; Mu et al. , 2020).

Στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής τεχνητών υδροβιότοπων, οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου είναι η προσρόφηση στην επιφάνεια του υποστρώματος και η καθίζηση, αλλά συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά παρέχουν αρκετά χαμηλή ικανότητα για προσρόφηση και καθίζηση (Vymazal and Krörfelová, 2008). Αλλά η απορρόφηση και η καθίζηση είναι διαδικασίες, οι οποίες με τη πάροδο του χρόνου επιβλέπουν κορεσμό, ακόμα και σε υλικά που εγγυόνται καλύτερες επιδόσεις για τους μηχανισμούς αυτούς (Vymazal, 2007). Οπότε συμπεραίνεται ότι, ο βασικότερος μηχανισμός

για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης του φωσφόρου από συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων, είναι η πρόσληψη από τα φυτά. Ενώ παράλληλα και η ποσότητα του φωσφόρου που συγκρατείται στη βιομάζα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από το είδος του φυτού (Maucieri et al. , 2020).

#### 2.4.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TSS)

Τα ανόργανα και τα αιωρούμενα στερεά, μέσα σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, απομακρύνονται με φυσικές διεργασίες. Οι κύριοι μηχανισμοί αφαίρεσης των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) είναι η καθίζηση, η διήθηση και η μικροβιακή αφομοίωση εντός του υποστρώματος (Wu et al. , 2011; Stefanakis et al. , 2014). Καθώς τα λύματα στραγγίζονται και διέρχονται μέσα από τους πόρους του υποστρώματος, τα στερεά παγιδεύονται μέσα στους πόρους, είτε μηχανικά είτε με πρόσφυση. Στους VF CWS, η περιοδική φόρτιση και ο ενδιάμεσος χρόνος ανάπαυσης του συστήματος, συνεισφέρουν στον αερισμό της κλίνης και παράλληλα στην οξείδωση συσσωρευμένων οργανικών στερεών (Stefanakis et al. , 2014)

Έχει αναφερθεί ότι η παρουσία βλάστησης βελτιώνει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των TSS, κυρίως λόγω της ύπαρξης ριζικού συστήματος (Hench et al., 2003 ). Επιπλέον, από τους (Zhu et al. , 2021) παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει εποχιακή αλλαγή στην αφαίρεση TSS και η υψηλή απόδοση αφαίρεσης TSS τους καλοκαιρινούς μήνες, κατά τους οποίους ήταν σε εξέλιξη το πείραμα, φαίνεται να σχετίζεται με τον υψηλό ρυθμό φόρτωσης που εφαρμοζόταν.

#### 2.4.5 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα βαρέα μέταλλα που υπάρχουν μέσα σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο είναι σε διαλυμένη, κολλοειδή ή σωματιδιακή μορφή, ενώ τα ελεύθερα μεταλλικά ιόντα είναι διαθέσιμα για βιολογική μετατροπή (Yeh, 2008; Stefanakis et al. , 2014).

Οι μηχανισμοί αφαίρεσης των βαρέων μετάλλων σε υδροβιότοπους είναι παρόμοιοι αυτών της αφαίρεσης φωσφόρου με κύρια την προσρόφηση στα ιζήματα του πυθμένα και σε οργανικές ύλες, ενώ σε μικρότερο βαθμό με την πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών. Άλλοι σημαντικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης τους είναι συγκαταβύθιση με οξυϋδροξείδια του σιδήρου και καταβύθιση ως σουλφίδια μετάλλων (Stefanakis et al. , 2014).

#### 2.4.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ

Η απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών δεν είναι συνήθως ο κύριος στόχος σε ένα σύστημα τεχνητού υδροβιότοπου. Με τη τρέχουσα ανάπτυξη των τεχνητών υδροβιότοπων φαίνεται ότι μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση παθογόνων από τα λύματα με ποσοστά απομάκρυνσης έως και 99 % (Alexandros & Akratos, 2016; Stanković, 2017 ).

Η απομάκρυνση των παθογόνων μπορεί να είναι χαμηλή, λόγω της μη ικανοποιητικής απόδοσης ενός τεχνητού υδροβιότοπου και της έλλειψης επεξεργασίας απολύμανσης ή άλλων χημικών παραγόντων που προσφέρει (Toscano et al., 2015; Andreo-Martínez et al., 2017 ).



Τέλος, παρά την υπόσχεση που προσφέρει η φυτοεξυγίανση για τους παθογόνους μικροοργανισμούς, οι ακριβείς μηχανισμοί απομάκρυνσης τους από τα μακροφύκη εξακολουθούν να συζητούνται. Οι κυριότεροι επικυρωμένοι μηχανισμοί απομάκρυνσης παθογόνων, σύμφωνα με Alufasi et al. (2017), είναι : (α) προσκόλληση, προσρόφηση, καθίζηση και μηχανική διήθηση από το ριζικό σύστημα των φυτών, (β) αλληλεπίδραση φυτικών μικροβίων εντός βιοϋμενίων και (γ) οξείδωση, υπερϊώδη ακτινοβολία και έκθεση σε βιοκτόνα. Παρόλα αυτά, η έρευνα, δεν έχει συνεχιστεί σχετικά με τη δυνατότητα απομάκρυνσης των παθογόνων μέσω της πρόσληψης και της αναστολής των παθογόνων στο σώμα του φυτού, αλλά και σχετικά με την αναστολή των μικροοργανισμών από τα φυτικά εκκρίματα.

## 2.5 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΘΕΤΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν ευρεία εφαρμογή στην επεξεργασία διαφόρων υγρών αποβλήτων. Την τελευταία εικοσαετία εφαρμόζονται επιτυχώς για την επεξεργασία αστικών λυμάτων, εμφανίζοντας σημαντική αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση ρύπων. Έχουν γίνει πολλές μελέτες με σκοπό την περεταίρω αύξηση της απόδοσης τους στην απομάκρυνση πιο επίμονων ρύπων, όπως TN, TP κ.α., με την χρήση διαφόρων ειδών βλάστησης, εναλλακτικά υποστρώματα κ.α.. Παρακάτω παρατίθενται μερικές μελέτες των τελευταίων χρόνων στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν VF CWs, για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων.

Οι Venditti et al. (2022), δοκίμασαν την απόδοση έξι διαφορετικών υποστρωμάτων, με τη χρήση *Phragmites Australis* και *Iris Pseudacorus*, σε VF CWs για την απομάκρυνση 27 αναδυόμενων ρύπων από αστικά λύματα. Με συνολική διάρκεια της εργαστηριακής έρευνας 357 ημέρες, σε ελεγχόμενες συνθήκες αποδείχθηκε ότι οι VF CWs, παρέχουν εξαιρετικής ποιότητας εκροή με σημαντική απομάκρυνση τόσο μακρορυπαντών όσο και μικρορυπαντών. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι συνολικές επιδόσεις απομάκρυνσης ξεπέρασαν το 90%, αλλά δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση σημαντικών διαφορών μεταξύ των υποστρωμάτων.

Οι Wu et al. (2019) μελέτησαν την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, από συνθετικά αστικά απόβλητα, με τη χρήση συνδυασμένων υποστρωμάτων βιοκεραμικών, ζεόλιθου και ανθρακίτη, σε VF CWs. Στις μικρές κλίμακας μονάδες εφαρμόστηκαν *Canna indica* L. και παρατηρήθηκε ότι όλες οι μονάδες ήταν αποτελεσματικές στην απομάκρυνση COD (73,9-78,7%), NH<sub>4</sub>-N (83,8-89,9%), TN (88,3-91,5%) και TP (87,1-90,9%) με μικρές μόνο αποκλίσεις στην απόδοση της επεξεργασίας.

Οι Stefanakis και Tsihrintzis (2012) λειτούργησαν για τρία χρόνια, δέκα πιλοτικές μονάδες VF CWs, για την μελέτη απόδοσης τους, υπό υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και αντίστοιχες συγκεντρώσεις ρύπων. Οι μονάδες φυτεύτηκαν με δύο είδη φυτών, είχαν διαφορετική σύσταση πορώδους μέσου και αποτελούνταν από τρία διαφορετικά πάχη. Οι απομακρύνσεις των μονάδων για οργανική ύλη BOD και COD ήταν 78%, για TN και NH<sub>4</sub>-N ήταν 58%, ενώ για TP και OP ήταν 37%.

Οι Hamada et al. (2021) διερεύνησαν την απομάκρυνση ανόργανων ρύπων, οργανικών και παθογόνων μικροοργανισμών από αστικά λύματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας σε δύο VF CWs πιλοτικής κλίμακας με εναλλακτικά υποστρώματα. Οι σχεδιασμοί των συστημάτων

αποτελούντο από δύο συστήματα, το πρώτο περιλάμβανε άνθρακα από ελαιοπυρήνα, ενώ το δεύτερο ήταν συνδυασμός του πρώτου με άνθρακα εσπεριδοειδών. Η βέλτιστη απόδοση απομάκρυνσης COD, BOD και κοβακτηρίδιου των κοπράνων επιτευχθεί με το δεύτερο σύστημα με 98%, 98% και 99% αντίστοιχα, με υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) 192hr, ενώ η υψηλότερη απομάκρυνση TP και TSS παρατηρήθηκε στο πρώτο σύστημα με 80% και 97% αντίστοιχα, με υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) 192hr.

Οι García-Ávila et al. (2019), σύγκριναν σε πιλοτική κλίμακα, την ικανότητα καθαρισμού αστικών πρωτοβάθμιων λυμάτων, σε VF CWs, δύο διαφορετικών ειδών φυτικής βλάστησης, *Phragmites Australis* και *Cyperus Papyrus*. Σε κάθε μονάδα είχε εφαρμοστεί γρανιτικό χαλίκι στο κάτω μέρος και πυριτική άμμος διαφορετικής κοκκομετρίας στο άνω μέρος, κάθε μονάδα είχε σταθερή εφαρμοζόμενη ροή 0,6 m<sup>3</sup> ημερησίως και υδραυλικό χρόνο παραμονής 1,12 ημέρες. Η χρονική διάρκεια που πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν τρεις μήνες και κατά τη διάρκεια παρακολουθούνταν φυσικές, χημικές και βιολογικές παράμετροι με την δειγματοληψία από τις εισόδους και τις εξόδους της μονάδας. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το *Cyperus Papyrus* είχε αποδοτικότερη απομάκρυνση ρύπων όπως BOD, COD, NH<sub>4</sub>-N, TP (80,69%, 69,87%, 69,69%, 50%, αντίστοιχα) ενώ το *Phragmites Australis* συγκρατεί περισσότερα TSS (62,85%).

Οι Rahi et al. (2020), ερεύνησαν την απομάκρυνση ρύπων από αστικά λύματα, σε δύο πιλοτικές VF CWs, όπου στη μία εφαρμόστηκε φυτική βλάστηση *Phragmites Australis*, ενώ στην άλλη όχι. Οι εκροές και στα δύο συστήματα ( με και χωρίς βλάστηση) ήταν σημαντικά βελτιωμένες σε σύγκριση με τις εισροές. Συγκριτικά με τη μονάδα χωρίς τη βλάστηση, η μονάδα με τη βλάστηση είχε καλύτερες απομακρύνσεις σε TSS, BOD, COD, NH<sub>4</sub>-N και PO<sub>4</sub>-P, ενώ παράλληλα στις εκροές και των δύο μονάδων παρατηρήθηκε αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), στα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS), στα νιτρικά (NO<sub>3</sub>-N) και στα θειικά(SO<sub>4</sub>), σε σύγκριση με τα ακατέργαστα λύματα.

## 2.6 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων με την αξιοποίηση των εφαρμογών των τεχνητών υδροβιότοπων. Η επιλογή των συστημάτων αυτών γίνεται, λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτουν όπως την μικρή κατανάλωση ενέργειας που προσφέρουν και συνεπώς το μικρό οικονομικό τους κόστος αλλά παράλληλα και λόγω της φιλικότητας των συστημάτων αυτών, ως προς το περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν τρεις πιλοτικές μονάδες κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής και μελετηθήκαν ως προς την αποδοτικότητα τους για επεξεργασία αστικού πρωτοβάθμιου λύματος, που συλλεγόταν από τον βιολογικό Χανίων. Στις δύο μονάδες εφαρμόστηκε ως πληρωτικό υλικό δύο στρώσεις δυο διαφορετικών διαμέτρων HDPE (High Density Poly Ethylene), ενώ στη τρίτη μονάδα εφαρμόστηκε χαλίκι. Όσον αφορά την βλάστηση, φυτεύτηκαν η μια μονάδα με το HDPE και η μονάδα με το χαλίκι, με *Phragmites Australis* (κοινό καλάμι), ενώ η τελευταία μονάδα αφέθηκε χωρίς βλάστηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΑ & ΥΛΙΚΑ

#### 3.1.1 ΛΥΜΑ ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΕΛ ΧΑΝΙΩΝ

Το λύμα που χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση του πειράματος, συλλεγόταν από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Χανίων. Η ΕΕΛ Χανίων κατασκευάστηκε σε 3 φάσεις, με την τελική να φάση να έχει δυναμικότητα, σε περιόδους αιχμής, 142,000 Ισοδύναμων Κατοίκων. Γίνεται καθημερινά παραγωγή, περίπου 200 m<sup>3</sup> επαναχρησιμοποιούμενου νερού και 1,500 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία χρησιμοποιούνται για τις ημερήσιες ανάγκες της εγκατάστασης. Επίσης παράγονται, κάθε έτος, περίπου 7,000,000 m<sup>3</sup> επεξεργασμένων λυμάτων, των οποίων ο βαθμός επεξεργασίας ξεπερνάει το 97% για το οργανικό φορτίο και το 95% για την αμμωνία.



**Εικόνα 3.1** Αεροφωτογραφία απεικόνισης ΕΕΛ Χανίων, (<https://deyach.gr>)

Συνοπτικά, τα στάδια επεξεργασίας των αστικών λυμάτων στην ΕΕΛ Χανίων είναι τα εξής:

#### i) Προεπεξεργασία

Τα λύματα φτάνουν στην εγκατάσταση μέσω του Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού και πραγματοποιείται χονδροεσχάρωση (εσχάρες διάκενου 20mm), ενώ παράλληλα με τη χρήση δεξαμενής εξισορρόπησης της φόρτισης, προωθούνται και βοθρολύματα που έχουν εισέρθει. Πραγματοποιείται εσχάρωση, όπου συλλέγονται τα εσχαρίσματα μετά από συμπίεση και έκπλυση και στη συνέχεια εξάμμωση, κατά τη οποία αφαιρούνται λίπη και άμμος. Η άμμος ξεπλένεται για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου ποσοστού του οργανικού φορτίου και τα λίπη οδηγούνται προς αναερόβια χώνευση ή αφυδάτωση.

#### ii) Πρωτοβάθμια Επεξεργασία (Καθίζηση)

Εισέρχονται τα λύματα στο κέντρο δύο δεξαμενών, όγκου 1,230 m<sup>3</sup> και διαμέτρου 22 m η καθεμία, για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου BOD<sub>5</sub> κατά 33% και αιωρούμενων στερεών TSS κατά 60%. Η κάθε δεξαμενή αποτελείται από μια περιστρεφόμενη γέφυρα, η οποία φέρει ξέστρο στο πυθμένα, για τη συλλογή της λάσπης και καλύπτεται από περιστρεφόμενο κάλυμμα για την συλλογή των οσμών. Τα λύματα εξέρχονται ακτινικά από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, μέσω υπερχειλιστών.

### iii) Βιολογική Επεξεργασία

Τα πρωτοβάθμια λύματα αναμιγνύονται με την ανακυκλοφορία από τις δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης, στη δεξαμενή επιλογής και οδηγούνται προς τις έξι δεξαμενές αερισμού, όγκου  $2,268 \text{ m}^3$  η καθεμία. Από το πυθμένα των δεξαμενών, πραγματοποιείται διοχέτευση οξυγόνου, με τη χρήση διαχυτήρων, με σκοπό την οξείδωση των λυμάτων και την κατανάλωση του οργανικού φορτίου, για τη παραγωγή βιομάζας (ενεργός ιλύς). Στη συνέχεια, διαχωρίζεται η βιομάζα από τα επεξεργασμένα λύματα στις τέσσερις δεξαμενές τελικής καθίζησης, διαμέτρου 33 m η καθεμία. Γίνεται άντληση της περίσσειας ιλύς που καθιζάνει, για περεταίρω επεξεργασία και αντλείται, παράλληλα, η ιλύς ανακυκλοφορίας προς τη δεξαμενή επιλογής και τους βιοαντιδραστήρες. Τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται προς την έξοδο, ακτινικά, με τη χρήση των υπερχειλιστών.

### iv) Απολύμανση – Βιομηχανικό Νερό

Σε δεξαμενή χλωρίωσης μαιανδρικού τύπου, ωφέλιμου όγκου  $600 \text{ m}^3$ , ο οποίος εξασφαλίζει έως και 30min χρόνο επαφής, τα λύματα απολυμαίνονται με χλωρίωση (με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου 15% σε ενεργό χλώριο) και αποχλωριώνονται (με υποθειώδες νάτριο). Στην εγκατάσταση λειτουργεί, επίσης, μονάδα βιομηχανικού νερού, η οποία πραγματοποιεί διήθηση με διάκενο  $10\mu\text{m}$ , έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης  $200\text{m}^3$  και διαθέτει μονάδα απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία. Η τελική διάθεση του επεξεργασμένου λύματος, πραγματοποιείται με τη χρήση υποθαλάσσιων αγωγών διάθεσης από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας διαμέτρου 710mm και μήκους 110m, οι οποίοι καταλήγουν σε βάθος 19m, μετά τη δεξαμενή χλωρίωσης και βάθος 16m, για τη μονάδα βιομηχανικού νερού.

### v) Επεξεργασία Ιλύος

Για τη μείωση του όγκου της ιλύος, αρχικά, πραγματοποιείται πάχυνση με τρεις φυγοκεντρικούς διαχωριστές. Γίνεται παράλληλα ανάμειξη της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος σε δυο κυκλικές δεξαμενές και η αναμειγμένη ιλύς τροφοδοτείται προς τους τέσσερις αναερόβιους χωνευτές. Με την αύξηση της θερμοκρασίας και την αναερόβια χώνευση, μειώνεται το οργανικό φορτίο κατά 40% - 50%, επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της ιλύος από αναερόβια βακτήρια και η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο καλύπτει ένα σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης. Η σταθεροποιημένη ιλύς τροφοδοτείται στις δύο δεξαμενές μεταπάχυνσης, στις οποίες πραγματοποιείται πάχυνση βαρύτητας και στη συνέχεια οδηγείται προς τη μονάδα αφυδάτωσης, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση δυο φυγοκεντρικών διαχωριστών και τη προσθήκη πολυηλεκτρολύτη. Τέλος, προστίθεται ασβέστης για την μείωση παθογόνων οργανισμών και των οσμών και η ιλύς μεταφέρεται στον τελικό εγκεκριμένο χώρο διάθεσης ΧΥΤ Κορακιάς.

### vi) Έργα απόσμησης

Πραγματοποιείται αναρρόφηση του αέρα, από τα κτήρια και τις δεξαμενές κατά την προεπεξεργασία, και μειώνονται οι οσμηρές ουσίες σε ποσοστό 99%, με την επεξεργασία του αέρα σε κεντρική πλυντηρίδα. Παράλληλα, για όλα τα έργα επεξεργασίας της ιλύος λειτουργούν τοπικές μονάδες προσρόφησης των οσμηρών ουσιών, τύπου ξηρής πλυντηρίδας, που καλύπτουν, αναρροφούν και επεξεργάζονται τον αέρα.

### vii) Αυτοματισμός Εγκατάστασης

Για την αυτοματοποιημένη λειτουργία της εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται όργανα on-line μέτρησης πεδίου (παροχόμετρα, όργανα μέτρησης ποιοτικών παραμέτρων) και το σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (SCADA). Με το σύστημα αυτό, επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο και πραγματοποιείται ο τηλε-έλεγχος και τηλεχειρισμός του Η/Μ μηχανισμού της εγκατάστασης.

Στο παράρτημα Α φαίνεται αναλυτικά η κάτοψη της ΕΕΛ με κάθε στάδιο επεξεργασίας.

(<https://deyach.gr/>)

Το αστικό λύμα που χρησιμοποιούταν ως εισροή στους τεχνητούς υγροβιότοπους συλλεγόταν μετά το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας και πριν την βιολογική επεξεργασία. Η συλλογή γινόταν από δεξαμενές δειγματοληψίας, όπου τα πρωτοβάθμια αστικά λύματα κατευθύνονται προς τις δεξαμενές επιλογής. Συλλέγονταν περίπου 100L-150L, κάθε 15 με 20 ημέρες, σε πλαστικά μπιτόνια των 20L και αποθηκεύονταν σε καταψύκτες. Λίγες μέρες πριν το αστικό λύμα χρησιμοποιηθεί, πραγματοποιούταν απόψυξη του, σε σκιερό μέρος. Τέλος, κάθε φορά που συλλεγόταν νέο αστικό λύμα, γίνονταν εργαστηριακές αναλύσεις για τον προσδιορισμό και τη καταγραφή διαφόρων συγκεντρώσεων και χαρακτηριστικών, σημαντικών για την ορθή διεξαγωγή του πειράματος.

### 3.1.2 ΧΑΛΙΚΙ

Η επιλογή κατάλληλων μέσων για εφαρμογή σε τεχνητούς υγροβιότοπους μπορεί να συμβάλει στην υψηλή απόδοση στην επεξεργασία. Σημαντικοί παράγοντες για τη επιλογή του μέσου είναι το μέγεθος των σωματιδίων, το πορώδες του μέσου και η φύση της επιφάνειας του μέσου (Amos et al. , 2003). Η ύπαρξη του υποστρώματος, πέρα από την υποστήριξη που παρέχει στην ανάπτυξη του φυτού, ενισχύει την ανάπτυξη βιοφίλμ στην επιφάνεια των σωματιδίων, το οποίο βοηθάει στην προσρόφηση θρεπτικών ουσιών, αλλά και προάγει την καθίζηση και τη διήθηση διαφόρων ρύπων (Li et al. , 2010; Priya et al. , 2013).

Το χαλίκι είναι το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μέσο σε τεχνητούς υγροβιότοπους. Η χρήση χαλικιών στην κατασκευή ενός υγροβιότοπου, σύμφωνα με (Stefanakis et al. ,2014), μπορεί να παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως:

- i. Υποστηρίζει την ανάπτυξη των μακροφύτων και των ριζών τους
- ii. Ενισχύει το μηχανισμό διήθησης και φιλτραρίσματος
- iii. Εξασφαλίζει υδραυλική αγωγιμότητα στο σύστημα, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων απόφραξης
- iv. Επιτρέπει την προσκόλληση και ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνεια τους, ενισχύοντας την επεξεργασία των λυμάτων και
- v. Υποστηρίζει την πραγματοποίηση διαφόρων διεργασιών μετασχηματισμού και απομάκρυνσης

Ο επαρκής όγκος των πόρων του υποστρώματος και η σταδιακή ανάπτυξη των ριζών στο μέσο, είναι σημαντικός παράγοντας στη διατήρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των μονάδων. Τυπικά αποτελεσματικά μεγέθη μέσων υποστρώματος που έχουν μελετηθεί



είναι: άμμος 0,2-0,6 mm, λεπτό χαλίκι 6-16 mm, μεσαίο χαλίκι 24-32 mm και χοντρό χαλίκι (βότσαλα) 60-130 mm (Stefanakis et al. , 2014).

Για τους προαναφερόμενους λόγους, στη παρούσα εργασία εφαρμόστηκε λεπτό προς μεσαίο χαλίκι διαμέτρου 17-20 mm στην μονάδα G (Gravel). Το χαλίκι προμηθεύτηκε από τοπική επιχείρηση δομικών υλικών.



**Εικόνα 3.2** Χαλίκι διαμέτρου 17-20mm

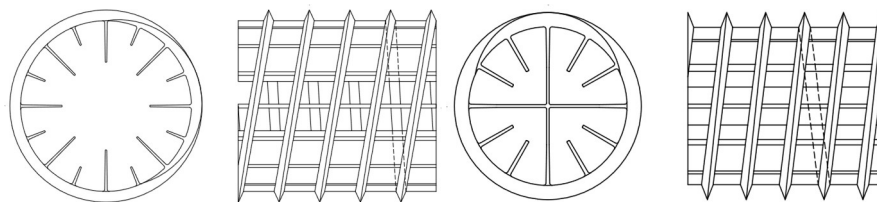
### 3.1.3 HDPE

Το HDPE (High Density Poly Ethylene), είναι ένα θερμοπλαστικό κατασκευασμένο από πετρέλαιο και θεωρείται από τα πιο ευέλικτα πλαστικά αφού χρησιμοποιείται ευρέως στη στην παραγωγή μεμβρανών συσκευασίας, υφασμάτων σακουλών, σωλήνων νερού, πλαστικών ξύλων, καρεκλών, χειρουργικών εμφυτευμάτων κ.λπ. ( Paxton et al. , 2019; Sadik et al. , 2021). Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά, η χρήση του HDPE παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, χαμηλότερη πυκνότητα, χαμηλό κόστος, χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, μικρότερο βάρος, ευκολότερη κατασκευή κ.λπ. (Savini et al. , 2020; Dabees et al. , 2021). Λόγω, όμως της χαμηλής του ικανότητας αποικοδόμησης στη φύση, η εκτεταμένη χρήση του HDPE έχει προκαλέσει σοβαρή περιβαλλοντική ρύπανση (Martins et al. , 2019).

Κύριες εφαρμογές των HDPE παρατηρούνται στη διαχείριση υδατικών αποβλήτων, για υδατοκαλλιέργειες και ιχθυοκαλλιέργειες. Για τις διαδικασίες διαχείρισης υδατικών λυμάτων, σημαντική είναι η ικανότητα ανάπτυξης βιοφίλμ στην επιφάνεια των πόρων του, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη επεξεργασία τους. Η ανάπτυξη βιοφίλμ προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη χωρική απαίτηση αλλά και στη αυξημένη σταθερότητα της διαδικασίας, λόγω σχηματισμού εξειδικευμένης βακτηριακής καλλιέργειας. Σημαντικά επίσης πλεονεκτήματα με τη χρήση των μέσων HDPE με βάση τους (Tatoulis et al., 2017; Luis et al., 2021), είναι: (α) έχουν υψηλό πορώδες, (β) μειώνεται η απαιτούμενη επιφάνεια κατασκευής CW και μειώνεται η πιθανότητα απόφραξης, (γ) είναι ελαφρύτερο και πιο εύκολο χρηστικά κατά τη κατασκευή ενός CW, (δ) έχει υψηλή αντοχή σε ρύπους, (ε) έχει χαμηλό κόστος αγοράς, (στ) ενισχύει την βιωσιμότητα και την αειφορία της διαδικασίας και (ζ) ενισχύεται η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων όπως BOD, COD και TSS (Zidan et al. , 2015).

Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα, για την παρούσα διπλωματική εργασία, στις μονάδες P (Plastic) και C (Control) εφαρμόστηκαν ως πληρωτικό υλικό, ένας τύπος ανακυκλωμένου πλαστικού, σε δύο διαφορετικά μεγέθη. Προμηθεύτηκαν από την εταιρεία Christian Stöhr GmbH & Co. KG, οι εμπορικές τους ετικέτες είναι HX38 Biocarrier και HX25KLL Biocarrier και το πορώδες τους ανέρχεται στο 95%. Το HX38 Biocarrier έχει μήκος

και διάμετρο 38mm και ειδική επιφάνεια  $188 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ , ενώ το HX25KLL έχει μήκος και διάμετρο 25mm και ειδική επιφάνεια  $360 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ .



**Εικόνα 3.3** Απεικόνιση HX38 Biocarrier, loose recycled HDPE black (αριστερά) και HX25KLL Biocarrier, loose recycled HDPE black (δεξιά). (<https://www.hel-x.eu/>)

### 3.1.4 ΦΥΤΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Το φυτό είναι ένα σημαντικό συστατικό ενός υδροβιότοπου που βελτιώνει τις αποδόσεις απομάκρυνσης ρύπων των συστημάτων μέσω του μηχανισμού πρόσληψης. Επίσης, παρέχει άνθρακα (C) και θέσεις προσκόλλησης για μικροβιακή ανάπτυξη στη ριζόσφαιρα (Saeed and Sun 2012; Bakhshoodeh et al., 2020). Μετά από πολλές έρευνες, στη αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης λόγω παρουσίας βλάστησης σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, έχει αποδειχθεί ο πολύτιμος ρόλος του (Kadlec και Wallace, 2009; Almuktar et al., 2018).

Τα φυτά μπορούν να αναπτύξουν και να διατηρήσουν μεγάλους μικροβιακούς πληθυσμούς στη ριζόσφαιρα τους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποικοδόμηση οργανικών ρύπων, οι οποίοι είναι προσροφημένοι στο εσωτερικό των τεχνητών υδροβιότοπων, από τα μικρόβια (Kurzbaum et al., 2010).

Για να χαρακτηριστεί ένα φυτό κατάλληλο για τη χρήση του σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο, είναι σημαντικό να καλύπτει τα ακόλουθα κριτήρια (Tanner et al., 1996):

- Οικολογική αποδοχή, να μην υπάρχει, δηλαδή, κίνδυνος ασθένειας, ανάπτυξης ζιζανίων αλλά και ενδεχόμενη αρνητική οικολογική ή γενετική συνέπεια στα περιβάλλοντα φυσικά συστήματα.
- Αντοχή στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, της περιοχής, σε παράσιτα και ασθένειες.
- Αντοχή σε υπερτροφικές συνθήκες και σε ρύπους μεγάλης συγκέντρωσης.
- Δυνατότητα γρήγορης προσαρμογής, με σκοπό το πολλαπλασιασμό, την εξάπλωση και την ανάπτυξη.
- Υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, είτε μέσω άμεσης αφομοίωσης και αποθήκευσης, είτε έμμεσα με την ενίσχυση μικροβιακών μετατροπών, όπως η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση.

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη ποικιλία φυτών, ανάλογα τα χαρακτηριστικά των ίδιων, των φυτών, αλλά και του υδροβιότοπου που κατασκευάζεται. Είναι σύνηθες να επιλέγονται φυτά που ευδοκιμούν, στη περιοχή κατασκευής των υδροβιότοπων, για λόγους οικονομικούς αλλά και για την ασφάλεια που εγγυάται στην αντοχή στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και στην αποφυγή ανάπτυξης παρασίτων. Τα φυτά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μπορεί να

είναι θαμνώδη, δενδρώδη ή ποώδη. Σε ένα υγρότοπο, συνήθως χρησιμοποιούνται φυτά της οικογενείας *Typha* (ψαθί), φυτά της οικογενείας *Scirpus* (Βούρλο) και φυτά της οικογενείας *Phragmites* (καλάμι).

Στο συγκεκριμένο πείραμα ως βλάστηση χρησιμοποιήθηκε φυτό της οικογενείας *Phragmites* και συγκεκριμένα νεαρές ρίζες *Phragmites Australis* (κοινό καλάμι). Είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα φυτά που χρησιμοποιούνται σε πειραματικούς τεχνητούς υγροβιότοπους αλλά και σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Το ύψος του κυμαίνεται από 2m έως 8m, αποτελείται από ξυλώδης βλαστό και τα φύλλα του φτάνουν σε μήκος τα 60-70cm.

Η επιλογή του κοινού καλαμιού (*Phragmites Australis*) έγινε λόγω πολλών παραγόντων, που συμβάλουν στη καλύτερη λειτουργία και απόδοση του πειράματος. Είναι ένα αρκετά ανθεκτικό φυτό που ευδοκimeί στη περιοχή της Κρήτης, όπου και έλαβε τόπο το πείραμα. Το κοινό καλάμι αναπτύσσει μεγάλες ποσότητες βιομάζας, τόσο πάνω από το έδαφος (βλαστός και φύλλωμα), όσο και κάτω (ριζικό σύστημα). Οι ρίζες του φυτού αναπτύσσονται οριζόντια και κατακόρυφα δημιουργώντας ένα μεγάλο πλέγμα ριζών, το οποίο μπλέκεται με τα σωματίδια του εδάφους, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης διαθέσιμης επιφάνειας επαφής με το λύμα για τη απορρόφηση θρεπτικών και ιόντων. Ακόμα, αερόβιοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε ένα λεπτό στρώμα γύρω από τις ρίζες του φυτού, ενώ αναερόβιοι μικροοργανισμοί εντοπίζονται στο υποκείμενο έδαφος. Σημαντική, επίσης, είναι η επίδραση των ριζών στο πορώδες της κλίνης, αφού η φυσική διήθηση συμβάλει στην απομάκρυνση πολλών ρύπων και μικροοργανισμών (Stefanakis et al. , 2011).



**Εικόνα 3.4** Φυτό *Phragmites Australis* (<https://greece.inaturalist.org/>)



## 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### 3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για τη κατασκευή των πιλοτικών μονάδων, που θα φιλοξενήσουν τους δύο τεχνητούς υγροβιότοπους G (Gravel) και P (Plastic), επιλέγονται πλαστικές δεξαμενές, κυλινδρικού σχήματος, ύψους 47cm και όγκου 50.53L. Οι δεξαμενές έχουν διάμετρο 37cm και εμβαδόν επιφάνειας 1214 cm<sup>2</sup>. Οι μονάδες τοποθετήθηκαν πάνω σε τσιμεντόλιθους, για την εξασφάλιση ομαλής βάσης και για την ευκολότερη δειγματοληψία, η οποία γίνεται από το πυθμένα της μονάδας. Στο κάτω μέρος κάθε μονάδας, λίγα εκατοστά πάνω από το πυθμένα, τοποθετείται μια βρύση η οποία ενώνεται με ένα λάστιχο, για τη διασφάλιση του ύψους της στάθμης του υγρού στα 30cm περίπου από το πυθμένα. Τα λάστιχα καταλήγουν σε πλαστικά δοχεία των 10L, στα οποία γίνεται η συλλογή των επεξεργασμένων λυμάτων και χειροκίνητα συλλέγονται τα δείγματα που αναλύονται.

Για τη πιλοτική μονάδα C (Control) επιλέχθηκε διαφορετική πλαστική δεξαμενή, κυλινδρικού σχήματος, ύψους 61cm, όγκου 58.69L, διαμέτρου 35cm και εμβαδόν επιφάνειας 980 cm<sup>2</sup>. Στη μονάδα C η δειγματοληψία γίνεται χειροκίνητα, με το άνοιγμα της ροής της βρύσης και η διασφάλιση του σταθερού ύψους της στάθμης πραγματοποιείται με τη βύθιση ενός κατασκευασμένου στύλου, σε κατακόρυφο σωλήνα που είναι τοποθετημένος μέσα στη δεξαμενή, ο οποίος είναι ρυθμισμένος να υπολογίζει και να εμφανίζει το ύψος που πρέπει (30 cm).

Στη συνέχεια, τοποθετείται το πληρωτικό υλικό σε κάθε δεξαμενή. Στις δεξαμενές P και C χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE, δύο μεγεθών, σε δυο στρώσεις. Η κάτω στρώση, με ύψος ≈30cm, αποτελείται από μεγάλο ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE διαμέτρου 3.5cm και ύψους 3.5 cm, ενώ η πάνω στρώση, με ύψος ≈15cm, από μικρό ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE με διάμετρο 2.5cm και ύψος 2.5cm. Για τη μονάδα G το πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαλίκι διαμέτρου 1.7- 2cm και εφαρμόστηκε σε υψος ≈45cm.

Όσο αναφορά τη βλάστηση των τεχνικών υγροβιότοπων G και P, συλλέχθηκαν και φυτεύτηκαν, λίγα εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος, νεαρές ρίζες *Phragmites Australis*, κοινό καλάμι. Οι ρίζες συλλέχθηκαν από τη περιοχή της Σούδας. Στη μονάδα C δεν τοποθετήθηκε κάποιου είδους βλάστησης.

Ο χώρος τοποθέτησης της πειραματικής διάταξης είναι στο θερμοκήπιο της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ενώ, οι εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιούνταν κάθε 6 με 9 μέρες, λάμβαναν χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος.



**Εικόνα 3.5** Πειραματική διάταξη με τις μονάδες G,P και C (από τα δεξιά προς τα αριστερά).



**Εικόνα 3.6** Απεικόνιση των επιφανειών των υποστρωμάτων των μονάδων G (αριστερά), P (μέση) και C (δεξιά).

### 3.2.2 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα κλιματολογικά στοιχεία που επικρατούσαν στη περιοχή που είχε κατασκευαστεί η πειραματική διάταξη και πιθανόν να την επηρέαζαν καθόλη τη διάρκεια πραγμάτωσης του πειράματος, πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό Chania. Ο σταθμός, ιδιοκτησίας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, που φιλοξενείται στο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης, βρίσκεται σε υψόμετρο 137m. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η μέση και η μέγιστη θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου και η επικρατούσα διεύθυνση ανέμου, που επικρατούσαν κατά τους μήνες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας (Ιούλιος- Δεκέμβριος). Οι τιμές συλλέχθηκαν από το (<http://meteosearch.meteo.gr/>).

Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμου
Ιούλιος	27.7	43.2	0.0	7.3	54.7	SW
Αύγουστος	28.1	41.6	0.2	7.2	54.7	SW
Σεπτέμβριος	23.8	36.0	10.8	6.3	37.0	SW
Οκτώβριος	18.7	28.8	39.0	6.5	48.3	SW
Νοέμβριος	17.1	28.4	14.4	6.8	80.5	SE
Δεκέμβριος	14.4	18.1	11.9	9.1	61.2	SW

### 3.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το πείραμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε διάρκεια 5.5 μήνες ( Ιούλιος- Δεκέμβριος). Παρακάτω διατυπώνονται με χρονολογική σειρά τα στάδια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας.

#### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Γίνεται η αρχική χωροθέτηση της πειραματικής διάταξης στο προαύλιο χώρο του θερμοκηπίου του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιλέγονται οι πιλοτικές μονάδες, που θα φιλοξενήσουν τους τεχνητούς υγροβιότοπους G, P και C. Οι δεξαμενές τοποθετούνται πάνω σε τσιμεντόλιθους, στις μονάδες G και P τοποθετείται μια βρύση η οποία ενώνεται με ένα λάστιχο, για τη διασφάλιση του ύψους της στάθμης του υγρού και τοποθετούνται και τα δοχεία συλλογής των τελικών δειγμάτων.

Στη συνέχεια, τοποθετείται το πληρωτικό υλικό σε κάθε δεξαμενή. Στις δεξαμενές P και C χρησιμοποιείται ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE, ενώ για τη μονάδα G χρησιμοποιείται χαλίκι, ως πληρωτικό υλικό. Τέλος φυτεύονται στις πιλοτικές μονάδες G και P, νεαρές ρίζες *Phragmites Australis*, κοινό καλάμι.

## ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

Αφού τοποθετήθηκαν οι νεαρές ρίζες *Phragmites Australis*, γεμίζονται οι μονάδες με νερό και αφήνονται τα καλάμια να προσαρμοστούν στο νέο τους περιβάλλον, με σκοπό την ανάπτυξη του ριζικού τους συστήματος, ώστε να είναι ικανά να λαμβάνουν τα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται και να αναπτύσσονται. Παράλληλα, κατεβαίνει η στάθμη του υγρού σταδιακά, μέχρι το ύψος που χρειάζεται για την έναρξη του πειράματος. Ο χρόνος επώασης τους ήταν 15 περίπου ημέρες .

## ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Με το πέρας των 15 ημερών και αφού τα καλάμια έχουν προσαρμοστεί στις αρχικές συνθήκες των τεχνητών υδροβιότοπων και η στάθμη έχει κατέβει στα 30cm, ξεκινάει η διαδικασία του πειράματος. Κατά τη διάρκεια του πειράματος και οι τρεις τεχνητοί υδροβιότοποι ποτίζονταν με συγκεκριμένο όγκο αστικού λύματος πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, το οποίο συλλεγόταν από την ΕΕΛ Χανίων. Γινόταν μέτρηση εκροής μετά από κάθε πότισμα και κάθε 6 με 9 μέρες πραγματοποιούνταν εργαστηριακές αναλύσεις στις εκροές κάθε μονάδας. Τα περίοδοι ποτίσματος, οι χρόνοι ανάπαυσης και ο όγκος ποτίσματος των τεχνητών υδροβιότοπων άλλαζαν κατά τους 2 πρώτους μήνες του πειράματος.

Τους δυο πρώτους μήνες της πειραματικής διαδικασίας η τροφοδοσία των συστημάτων ήταν καθημερινή, ενώ από το τρίτο μήνα μέχρι το πέρας του πειράματος, οι πιλοτικές μονάδες ποτίζονταν ανά τρεις μέρες, δηλαδή μεσολαβούσαν 2 μέρες από κάθε πότισμα. Αντίστοιχα για τον όγκο ποτίσματος, κάθε τεχνητού υδροβιότοπου, κατά το καθημερινό πότισμα αρχικά ήταν 1L, ενώ κατά τον δεύτερο μήνα αυξήθηκε στο 1.5L. Όταν ο χρόνος ποτίσματος από καθημερινή βάση, μειώθηκε στην τροφοδοσία ανά 3 μέρες, ο όγκος του λύματος αρχικά ήταν στα 5L ενώ μετά από ένα μήνα αυξήθηκε στα 8L για κάθε μονάδα.

## ΤΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Μετά το πέρας των 6 μηνών ποτίσματος, συλλογής και μέτρησης εκροών και εβδομαδιαίων αναλύσεων, και εφόσον το πλήθος και τα αποτελέσματα των αναλύσεων των εκροών ήταν αρκετά, για ένα πλήρες και έγκυρο αποτέλεσμα της λειτουργίας και επεξεργασίας των τεχνητών υδροβιότοπων, η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε.

## 3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Το λύμα που συλλεγόταν από την ΕΕΛ Χανίων (Initial), από τη πρωτοβάθμια εκροή και οι εκροές, που συλλέγονταν από τα τρία συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων ( G, P και C), υπόκειντο σε εργαστηριακές αναλύσεις, ώστε να προσδιοριστούν:

- i) Το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD<sub>5</sub>)
- ii) Το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)
- iii) Το Ολικό Άζωτο (TN)
- iv) Ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)
- v) Το Αμμωνιακό Άζωτο (NH<sub>4</sub>-N)

- vi) Το Νιτρικό Άζωτο (NO<sub>3</sub>-N)
- vii) Ο Ολικός Φωσφόρος (TP)
- viii) Ο Φώσφορος στη μορφή Φωσφορικών (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)
- ix) Τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)
- x) Το pH και
- xi) Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC)

### 3.3.1 ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ BOD<sub>5</sub>

Για το προσδιορισμό του BOD<sub>5</sub> το Initial και οι εκροές των G, P, C αποθηκεύονται σε γυάλινα δοχεία από τα οποία μεταφέρεται συγκεκριμένος όγκος από κάθε δείγμα, ανάλογα το BOD<sub>5</sub> που αναμένεται στο καθένα, σε ειδικές γυάλινες φιάλες όγκου 500ml. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε κάθε φιάλη 6 σταγόνες KOH, ένας μαγνήτης, σφραγίζονται με μανομετρικό αισθητήρα και τοποθετούνται σε βάση ανάδευσης, η οποία βρίσκεται σε ειδικό επωαστικό κλίβανο ρυθμισμένο στους 20°C, για διάστημα 5 ημερών. Μετά το πέρας των 5 ημερών λαμβάνεται η μέτρηση της συγκέντρωσης BOD<sub>5</sub> για κάθε δείγμα λαμβάνοντας υπόψιν τον όγκο που έχει τοποθετηθεί από το καθένα.

### 3.3.2 ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ COD

Για το προσδιορισμό του COD χρησιμοποιείται το εργαστηριακό kit COD Cell Test HCO39826 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 25–1000 mg/l της εταιρίας WTW. Σε προθερμασμένο μάτι, στους 148°C, τοποθετούνται τα ειδικά αντιδραστήρια, στα οποία έχουν εμβολιστεί 3ml από κάθε δείγμα. Πραγματοποιείται χώνευση για 2 ώρες, τα φιαλίδια αφαιρούνται από το μάτι και αφήνονται για ξεκούραση μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τοποθετούνται σε φασματοφωτόμετρο, της εταιρίας SHIMADZU UV-1202, το οποίο έχει ρυθμιστεί στα 610nm και έχει μηδενιστεί με τη χρήση τυφλού διαλύματος. Γίνεται υπολογισμός της απορρόφησης κάθε δείγματος και με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του COD (Παράρτημα Β), υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις τους σε mg/L.

### 3.3.3 ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ TN

Για το προσδιορισμό του TN χρησιμοποιείται το εργαστηριακό kit Nitrogen (Total) Cell Test 1.4763.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου της Merck με εύρος συγκεντρώσεων 10.0-1500.0 mg/l N. Προθερμαίνεται το μάτι στους 120°C και τοποθετούνται, για χώνευση, τα φιαλύδια, στα οποία έχουν τοποθετηθεί 1ml από κάθε δείγμα, 9ml απιονισμένο νερό και τα αντιδραστήρια που αναγράφονται στις οδηγίες του kit. Η χώνευση διαρκεί 1 ώρα και αφού τα φιαλίδια αφαιρεθούν από το μάτι και φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, συλλέγεται 1ml από κάθε χωνευμένο δείγμα και τοποθετείται σε ειδικά αντιδραστήρια που περιέχονται στο kit. Τέλος, ενώ τα αντιδραστήρια βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με τη χρήση του ειδικού φωτομετρικού μηχανήματος για ολικό άζωτο Merck NOVA 60, πραγματοποιείται φασματοφωτομέτρηση των δειγμάτων. Το μηχάνημα περιέχει έτοιμη καμπύλη βαθμονόμησης, οπότε οι μετρήσεις δίνονται απευθείας σε mg/L.

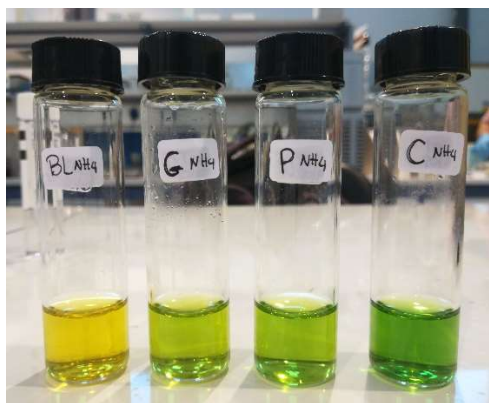


#### 3.3.4 ΟΛΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ TOC

Για τον προσδιορισμό του TOC, χρησιμοποιείται το όργανο SSM-5000A της Shimadzu. Κατά τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται ο Ολικός Άνθρακας (TC) και ο Ανόργανος Άνθρακας (IC) και με τη διαφορά τους να υπολογίζεται ο TOC ( $TOC = TC - IC$ ). Για τον προσδιορισμό του TC, διηθημένο δείγμα εισέρχεται στο σωλήνα καύσης στους 900 °C, ο οποίος περιέχει καταλύτη Pt/Co, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται οξείδωση του συνολικού άνθρακα και σχηματισμός CO<sub>2</sub>. Οξυγόνο, στη συνέχεια ρέει στο σωλήνα καύσης, και οδηγείται για ξήρανση, αφού παραλάβει τα προϊόντα της διαδικασίας. Μετά τη ξήρανση, το οξυγόνο μεταφέρεται στον ανιχνευτή IR για τον τελικό υπολογισμό του CO<sub>2</sub>. Έπειτα υπολογίζεται ο IC, ο οποίος βρίσκεται στα ανθρακικά άλατα του δείγματος. Γίνεται οξίνιση του δείγματος με φωσφορικό οξύ, για τη μετατροπή των ανθρακικών αλάτων σε CO<sub>2</sub>, και καύση του στους 200°C. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν για την ανίχνευση του CO<sub>2</sub>, από τον ανιχνευτή IR. Στην περίπτωση που το δείγμα δεν περιέχει IC, τότε ισχύει  $TOC = TC$ .

#### 3.3.5 ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΑΖΩΤΟ NH<sub>4</sub>-N

Για το προσδιορισμό του NH<sub>4</sub>-N, χρησιμοποιείται το kit Ammonium Test 1.00683.0001 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 2.0-150 mg/l NH<sub>4</sub>-N της εταιρείας Supelco. Συλλέγεται 0.10ml διηθημένου δείγματος, με τη χρήση ειδικού φίλτρου διήθησης μεμβράνης Whatman 0.45μm, από κάθε δείγμα εκροής και πραγματοποιείται η διαδικασία που αναγράφεται στο kit. Αφού, περάσει το κατάλληλο διάστημα, έχουν γίνει οι απαραίτητες αντιδράσεις και τα διαλύματα έχουν χρωματιστεί κατάλληλα, με τη χρήση εργαστηριακών κυψελίδων, μετريέται η απορρόφηση κάθε δείγματος με τη χρήση του φασματοφωτόμετρου της εταιρείας SHIMADZU UV-1202, το οποίο έχει αρχικά μηδενιστεί, με τη χρήση τυφλού διαλύματος (blank), και ρυθμίζεται στα 690nm. Τέλος, με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης για το αμμωνιακό άζωτο (Παράρτημα Β), υπολογίζεται η συγκέντρωση κάθε δείγματος σε mg/L.



**Εικόνα 3.7** Δείγματα μετά την προσθήκη αντιδραστηρίων, για το προσδιορισμό του NH<sub>4</sub>-N, και τον κατάλληλο χρωματισμό τους.

#### 3.3.6 ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ NO<sub>3</sub>-N

Για το προσδιορισμό του NO<sub>3</sub>-N, χρησιμοποιείται το kit Nitrate Cell Test HCO36730 φασματοφωτομετρικής μεθόδου με εύρος συγκεντρώσεων 0.5-25.0 mg/l NO<sub>3</sub>-N της



εταιρείας WTW. Συλλέγεται 1ml διηθημένου δείγματος, με τη χρήση ειδικού φίλτρου διήθησης μεμβράνης Whatman 0.45μm, από κάθε δείγμα εκροής και πραγματοποιείται η διαδικασία που αναγράφεται στο kit. Αφού, περάσει το κατάλληλο διάστημα, έχουν γίνει οι απαραίτητες αντιδράσεις και τα διαλύματα έχουν χρωματιστεί κατάλληλα. Χρησιμοποιείται το φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202, ρυθμίζεται το όργανο στα 525nm, γίνεται μηδενισμός του οργάνου, με τη χρήση τυφλού διαλύματος (blank), και η υπολογίζεται η απορρόφηση κάθε δείγματος. Με τη χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης για NO<sub>3</sub>-N (Παράρτημα Β), υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων σε mg/L.

### 3.3.7 ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ TP

Για τον προσδιορισμό του TP, συλλέγονται 50ml από κάθε δείγμα και τοποθετούνται σε ποτήρια ζέσεως. Σε κάθε δείγμα προστίθενται:

- 1ml πυκνού H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 5ml HNO<sub>3</sub>

και τοποθετούνται σε θερμαντικό μάτι, για χώνευση, με σκοπό τη διαλυτοποίηση των στερεών, έως ότου ο όγκος του διαλύματος φτάσει περίπου στο 1ml. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ρύθμιση του pH κάθε διαλύματος σε εύρος 6 με 7, γίνεται διήθηση του διαλύματος, με τη χρήση ειδικού φίλτρου διήθησης μεμβράνης Whatman 0.45μm, και συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό έως τα 50ml.

Παράλληλα, ακολουθείται η πρότυπη μέθοδος 4500-P Ascorbic method, κατά την οποία γίνεται παρασκευή του αντιδραστηρίου που περιέχει:

- Sulfuric Acid 5M : 70mL στα 500mL
- Ammonium Molybdate : 20g στα 500mL
- Potassium Antimonyl Tartrate: 1.3715g στα 500mL
- Ascorbic Acid : 1.76g στα 100mL

Για την παρασκευή 100ml του αντιδραστηρίου combined reagent, χρησιμοποιούνται, με τη σειρά που αναγράφονται, οι εξής ποσότητες από καθένα από τα παραπάνω διαλύματα που έχουν παραχθεί:

- 50ml Sulfuric Acid 5M
- 15ml Ammonium Molybdate
- 5ml Potassium Antimonyl Tartrate
- 30ml Ascorbic Acid

Προστίθεται σε κάθε δείγμα που έχει προκύψει, μετά τη διήθηση, 8ml από το αντιδραστήριο combined reagent. Τα διαλύματα αφήνονται σε ηρεμία μέχρι να περάσει το κατάλληλο διάστημα, να γίνουν οι απαραίτητες αντιδράσεις και να έχουν χρωματιστεί κατάλληλα. Το φασματοφωτόμετρο της εταιρείας SHIMADZU UV-1202, ρυθμίζεται στα 880nm και μηδενίζεται με τη χρήση τυφλού διαλύματος (blank). Τέλος, με τη χρήση ειδικών εργαστηριακών κυψελίδων, μετριέται η απορρόφηση κάθε δείγματος και με τη καμπύλη

βαθμονόμησης (Παράρτημα Β), για τον φώσφορο, υπολογίζεται η συγκέντρωσή τους σε mg/L.

### 3.3.8 ΦΩΣΦΟΡΟΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

Για τον προσδιορισμό των  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , διηθούνται 50ml, από κάθε δείγμα, με τη χρήση ειδικού φίλτρου διήθησης μεμβράνης Whatman 0.45μm. Στη συνέχεια, με τη χρήση της μεθόδου 4500-P Ascorbic method, παρασκευάζονται 100ml αντιδραστηρίου combined reagent, με τα συστατικά και τις δοσολογίες που αναφέρονται και παραπάνω κατά του προσδιορισμού του ολικού φωσφόρου. Μετά από το απαραίτητο χρονικό διάστημα που χρειάζονται τα διαλύματα, για να αντιδράσουν και να χρωματιστούν κατάλληλα, τοποθετούνται σε κυψελίδες του εργαστηρίου και μετريέται η απορρόφηση τους στο φασματοφωτόμετρο της εταιρίας SHIMADZU UV-1202, το οποίο είναι ρυθμισμένο στα 880nm και έχει μηδενιστεί με τη χρήση τυφλού διαλύματος (blank). Τέλος, χρησιμοποιείται η καμπύλη βαθμονόμησης του φωσφόρου (Παράρτημα Β), για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης κάθε δείγματος σε mg/L.

### 3.3.9 ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ TSS

Για τον προσδιορισμό των TSS, γίνεται ζύγιση, σε ζυγό SHIMADZU LIBROR AEG-220 ακρίβειας 0.0001g, των υαλόφιλτρων διήθησης που θα χρησιμοποιηθούν. Τα υαλόφιλτρα έχουν διάμετρο 47mm, είναι της εταιρίας Whatman και είναι τύπου GF/C. Στη συνέχεια, συλλέγεται συγκεκριμένος όγκος από κάθε δείγμα και διηθείται, με τη χρήση των υαλόφιλτρων διήθησης, σε αντλία κενού της εταιρείας Vaccubrand παροχής 3.6 / 4.0 m<sup>3</sup>/h. Αφού διηθηθεί κάθε δείγμα, μεταφέρονται τα φίλτρα σε προθερμασμένο φούρνο για ξήρανση στους 100°C, για 30min. Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρόνου, τα φίλτρα ζυγίζονται εκ νέου και προσδιορίζεται η ξηρή μάζα κάθε δείγματος. Ο τύπος για τον προσδιορισμό των TSS είναι ο εξής :

$$TSS \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(Βάρος υαλόφιλτρου μετά(g) - Βάρος υαλόφιλτρου πριν(g))}{Όγκος δείγματος που διηθείται (L)} * 1000$$

### 3.3.10 pH

Για τον προσδιορισμό του pH, χρησιμοποιείται το πεχάμετρο CRISON microPH 2002. Πριν τις μετρήσεις, του pH, των δειγμάτων, το πεχάμετρο βαθμονομείται, με τη χρήση διαλυμάτων, τα οποία έχουν pH 4 και 7. Στη συνέχεια, αφού το πεχάμετρο βαθμονομηθεί, βυθίζεται το ηλεκτρόδιο του οργάνου σε κάθε δείγμα, με αποτέλεσμα την μέτρηση και ένδειξη του pH τους.



**Εικόνα 3.8** Υπολογισμός pH εκροής, με βύθιση του ηλεκτρόδιου

#### 3.3.11 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC

Για τον προσδιορισμό της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας, χρησιμοποιείται το όργανο CRISON microCM 2202. Με την έναρξη λειτουργίας του οργάνου, το όργανο βαθμονομείται από μόνο του και βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο, που συνδέεται με το όργανο, σε κάθε δείγμα εκροής, εμφανίζεται η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ή  $\text{mS}/\text{cm}$ .

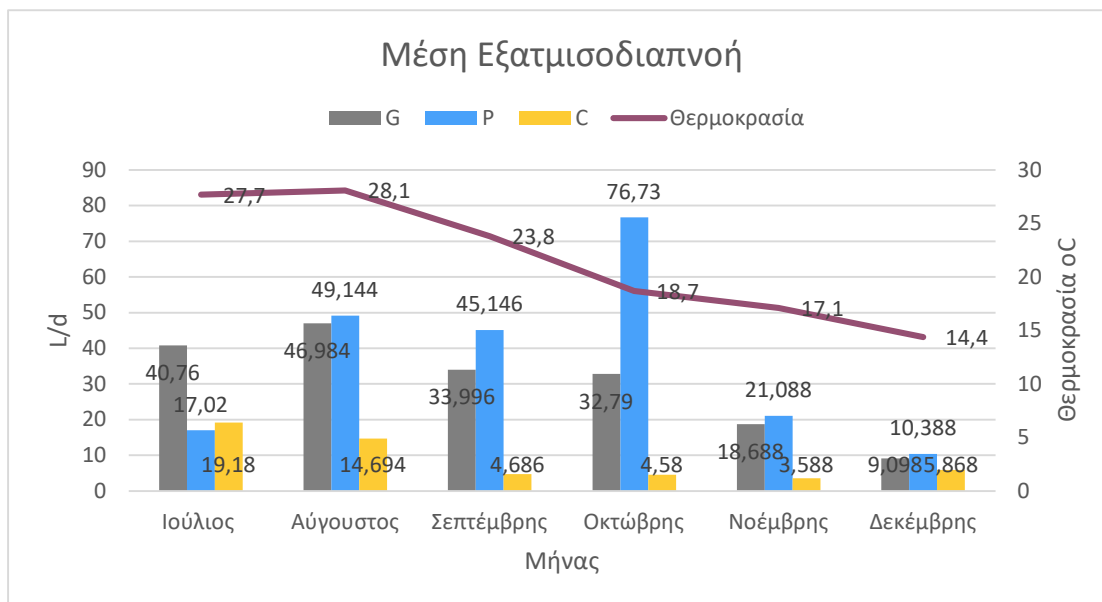
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι μονάδες G, P και C ποτίζονταν με πρωτοβάθμιο λύμα που προερχόταν από την ΕΕΛ Χανίων. Λόγω της αρχικής φάσης των συστημάτων, κατά τον μήνα Ιούλιο και το πρώτο 20-ήμερο του Αυγούστου, η τροφοδοσία των συστημάτων πραγματοποιούνταν σε καθημερινή βάση με μέση παροχή 1,5L/d. Στη συνέχεια, και για ένα μήνα, η τροφοδοσία γινόταν ανά 3 μέρες, αφήνοντας 2 μέρες ανάπαυσης στα συστήματα, ενώ παράλληλα αυξήθηκε η μέση παροχή σε 5 L/3d. Τέλος, από το 2<sup>ο</sup> 10-ήμερο του Σεπτεμβρίου μέχρι τις 10 Δεκεμβρίου, ο τρόπος τροφοδοσίας παρέμεινε ίδιος, ανά 3 μέρες, αλλά η μέση παροχή αυξήθηκε στα 8 L/3d. Παράλληλα με τον όγκο της εισροής, που εφαρμοζόταν σε κάθε μονάδα, μετρούνταν και ο αντίστοιχος όγκος των εκροών τους.

Οι μετρήσεις των εισροών και των εκροών του κάθε συστήματος, είχαν ως σκοπό την δημιουργία ενός υδατικού ισοζυγίου, για την παροχή πληροφοριών που αφορούν την επιρροή των κλιματολογικών παραγόντων (Θερμοκρασία, Ηλιακή ακτινοβολία και Βροχόπτωση), στις απομακρύνσεις της κάθε μονάδας. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση εξατμισοδιαπνοή (ET) για κάθε μονάδα. Ως εξατμισοδιαπνοή, ορίζεται ως η απευθείας εξάτμιση του νερού από το έδαφος αλλά και παράλληλα η διαπνοή του φυτού. Αποτελεί σημαντική παράμετρο στην υδρολογική ισορροπία των υγροβιότοπων και σχετίζεται με κλιματολογικές που επικρατούν, όπως Θερμοκρασία, Ηλιακή ακτινοβολία, Βροχόπτωση κ.α. Οι τιμές στην μονάδα C, σχετίζονται μόνο με την απευθείας εξάτμιση, αφού το σύστημα λειτουργούσε χωρίς την παρουσία βλάστησης.

**Διάγραμμα 4.1** Μέση εξατμισοδιαπνοή για τις μονάδες G, P και C.



Παρατηρώντας το διάγραμμα 4.1, φαίνεται ότι το μήνα Ιούνιο οι τιμές ET στις G και P είναι παρόμοιες. Παρά την αρχική φάση των συστημάτων, φαίνεται ότι το ριζικό σύστημα των δύο μονάδων έχει ήδη αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό, και με τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν απομακρύνουν το μεγαλύτερο μέρος των ημερήσιων όγκων. Η ικανότητα των φυτών για εξατμισοδιαπνοή, παρατηρείται από την σημαντική διαφορά των τιμών των μονάδων G και P, με τη μέση τιμή ET της μονάδας C.

Αντίστοιχα αποτελέσματα για τις μονάδες G και P, εμφανίζονται και τον μήνα Αύγουστο, αντίστοιχα, ενώ η μονάδα C παραμένει στα ίδια επίπεδα. Οι τιμές των G, P μονάδων, έχουν μια μικρή αύξηση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του Ιουλίου, λόγω της αλλαγής του τρόπου και της ποσότητας τροφοδοσίας.

Όσον αφορά τον μήνα Σεπτέμβριο, κατά τον οποίο η παροχή όπως προαναφέρθηκε ήταν 5 L/3d η μονάδα P παρουσιάζει σημαντική μέση τιμή, ενώ η μονάδα G φαίνεται να εμφανίζει λίγο μικρότερη. Η διαφορά των τιμών εξατμισοδιαπνοής που λάμβανε χώρα στις δύο μονάδες, οφείλεται στην γρηγορότερη ανάπτυξη των ριζών στην P, σε σύγκριση με τη G, που πιθανόν να την επηρέασε η ύπαρξη του HDPE. Παράλληλα η μέση απομάκρυνση στην μονάδα C, φαίνεται να αυξήθηκε λίγο, γεγονός που αιτιολογείται από το μικρό ύψος βροχόπτωσης που εμφανίστηκε τον Σεπτέμβριο.

Τον μήνα Οκτώβρη, με την αύξηση της ποσότητας τροφοδοσίας, τη μέση θερμοκρασία στους 18,7 °C και την υψηλή μέση βροχόπτωση που εμφανίστηκε (39,0 mm), οι μονάδες G και P εμφάνισαν παρόμοιες τιμές μέσης εξατμισοδιαπνοής. Η ριζόσφαρα της μονάδας G πιθανόν να αυξήθηκε, ενώ η μείωση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνεται να επηρέασαν αρνητικά την P. Η υψηλή βροχόπτωση που παρουσιάστηκε, φαίνεται να βοήθησε την μέση τιμή ET στην μονάδα C.

Η μέση εξατμισοδιαπνοή των μονάδων μειώνεται σημαντικά τον Νοέμβριο με την. Η μέση θερμοκρασία έχει μειωθεί στους 17,1 °C, ενώ και η μέση βροχόπτωση είναι αρκετά χαμηλή (14,4 mm), κάτι που φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά και τη μονάδα C. Αντίστοιχα, με την περαιτέρω μείωση της μέσης θερμοκρασίας στους 14,4 °C κατά τις πρώτες 10 μέρες του Δεκέμβρη, η μέση εξατμισοδιαπνοή μειώθηκε κι άλλο.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι οι υψηλές θερμοκρασίες τους καλοκαιρινούς μήνες βοήθησαν σημαντικά στην γρήγορη ανάπτυξη των ριζών των φυτών, στις μονάδες G και P, τα οποία βοήθησαν σημαντικά στην ET καθόλη τη διάρκεια του πειράματος μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Παράλληλα, η απουσία βλάστησης, στην μονάδα C, ήταν αισθητή κατά τη διάρκεια του πειράματος, με τις τιμές στην μονάδα αυτή να είναι ιδιαίτερα χαμηλές.

Στο παράρτημα Γ παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις εισροών και εκροών, οι απομακρύνσεις των όγκων και οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής για τις μονάδες G,P και C, για τους μήνες Ιούλιο- Δεκέμβρη.

#### 4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΡΟΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, η εισροή του παρόντος πειράματος προερχόταν από αστικό λύμα που συλλεγόταν από την ΕΕΛ Χανίων. Η συλλογή γινόταν μετά την διεργασία της πρωτοβάθμιας καθίζησης κατά την οποία γίνεται σημαντική απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, με τον μηχανισμό καθίζησης. Στον παρακάτω πίνακα

παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και το εύρος τιμών, των εισροών, για τις παραμέτρους που μελετήθηκαν κατά την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

**Πίνακας 4.1** Μέση τιμή και εύρος τιμών για παραμέτρους εισροών.

Παράμετροι	Μέση Τιμή	Εύρος τιμών
<b>BOD<sub>5</sub></b>	312 ± 48,41 mg/L	250-380 mg/L
<b>COD</b>	444,60 ± 106,95 mg/L	370-720 mg/L
<b>TOC</b>	42,8 ± 14,2 mg/L	25,3-66,4 mg/L
<b>TN</b>	68,50 ± 6,93 mg/L	56-78 mg/L
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	41,59 ± 8,05 mg/L	28,50-55,10 mg/L
<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	<5	<5
<b>TP</b>	4,091 ± 0,655 mg/L	3,243-5,181 mg/L
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P</b>	2,483 ± 0,498 mg/L	1,821-3,786 mg/L
<b>pH</b>	7,23 ± 0,15	6,91-7,35
<b>EC</b>	1127 ± 84 (μS/cm)	1012-1358 (μS/cm)
<b>TSS</b>	136,28 ± 65,58 mg/L	54,67-260,0 mg/L
<b>BOD<sub>5</sub>/COD</b>	0,702	
<b>COD/BOD<sub>5</sub></b>	1,425	

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.1 οι μέσες τιμές των BOD<sub>5</sub>, COD και TOC φαίνεται να είναι σε πολύ καλά επίπεδα, γεγονός που επαληθεύει την λειτουργία της πρωτοβάθμιας καθίζησης στην απομάκρυνση σημαντικού ποσοστού οργανικών φορτίων. Επίσης από το λόγο BOD<sub>5</sub>/COD, που φανερώνει την βιοαποδομησιμότητα της οργανικής ύλης, όπως επίσης και την σταθερότητα που έχει επέλθει στη διεργασία της Πρωτοβάθμιας Καθίζησης στον Βιολογικό, φαίνεται ότι είναι σε πολύ καλά επίπεδα με τιμή 0,702, δεδομένου ότι οι αναλογίες του λόγου BOD<sub>5</sub>/COD κυμαίνονται από 0,03 έως 0,76. Επίσης, ο λόγος COD/BOD<sub>5</sub>, που φανερώνει τη δυσκολία βιοαποικοδόμησης του αποβλήτου, είναι επίσης σε καλά επίπεδα, δεδομένου ότι το απόβλητο κατά τη διαδικασία της Πρωτοβάθμιας Καθίζησης δεν έχει ακόμα επέλθει σε χημική οξείδωση.

Όσο αναφορά τις υψηλές μέσες συγκεντρώσεις TN και NH<sub>4</sub>-N, καθώς και την υπερβολικά χαμηλή συγκέντρωση NO<sub>3</sub>-N, 68,50 ± 6,93 mg/L, 41,59 ± 8,05 mg/L και <5 mg/L αντίστοιχα, επιβεβαιώνουν τις αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν κατά το στάδιο της Πρωτοβάθμιας Καθίζησης. Η δεξαμενές είναι καλυμμένες με περιστρεφόμενα καλύμματα. Η νιτροποίηση-απονιτροποίηση των λυμάτων πραγματοποιείται σε επόμενο στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας, με τον εφοδιασμό των λυμάτων στις δεξαμενές αερισμού.

Οι TP και PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, εμφανίζονται να έχουν υψηλές μέσες τιμές συγκέντρωσης 4,091 ± 0,655 mg/L και 2,483 ± 0,498 mg/L αντίστοιχα, κάτι που είναι λογικό αφού οι συνθήκες κατά την



Πρωτοβάθμια Καθίζηση δεν ευνοούν την απομάκρυνση του, η οποία πραγματοποιείται σε επόμενο στάδιο επεξεργασίας.

Οι μέσες τιμές pH και EC που επικρατούσαν στο αρχικό λύμα εισροής,  $7,23 \pm 0,15$  και  $1127 \pm 84$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) είναι οι προβλεπόμενες, δεδομένου ότι οι ιδανικότερες συνθήκες ανάπτυξης μικροοργανισμών για την αντιμετώπιση οργανικών ρύπων ευνοείται σε εύρος pH 6 έως 8.

Τέλος, η μέση τιμή συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών TSS,  $136,28 \pm 65,58$  mg/L, παρατηρείται σε πολύ καλά επίπεδα, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της Πρωτοβάθμιας Καθίζησης για την σημαντική απομάκρυνση τους μέσω του μηχανισμού καθίζησης.

#### 4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΩΝ

Παρακάτω γίνεται ανάλυση και σύγκριση των τριών πιλοτικών μονάδων για την επεξεργασία και την απομάκρυνση διαφόρων ρύπων, με δεδομένα που συλλέχθηκαν από εργαστηριακές αναλύσεις. Όπως προαναφέρθηκε, οι πιλοτικές μονάδες που κατασκευάστηκαν για την επεξεργασία, είναι η G (Υπόστρωμα: Gravel, βλάστηση: Phragmites Australis), η P (Υπόστρωμα: HDPE, βλάστηση: Phragmites Australis) και η C (Υπόστρωμα: HDPE, χωρίς βλάστηση).

##### 4.3.1 ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ BOD<sub>5</sub>

**Πίνακας 4.2** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης BOD<sub>5</sub> και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

BOD <sub>5</sub>	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	312,00±48,41	250-380	-	-
G (Gravel)	65,00±39,71	18-165	78,71±13,36	50,0-95,0
P (Plastic)	54,30±40,02	2-115	82,16±13,90	57,41-99,31
C (Control)	105,85±51,23	26-195	65,04±18,48	27,78-92,78

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.2 καθώς και τα διαγράμματα 4.2 και 4.3, που αφορούν τις συγκεντρώσεις εκροής και απομάκρυνσης, των μονάδων G, P και C, συμπεραίνεται ότι η μονάδα P έχει μικρότερη μέση τιμή συγκέντρωσης από τη μονάδα G με τιμές 54,30±40,02 mg/L και 65,00±39,71 mg/L, αντίστοιχα. Επίσης, και η μέση τιμή απομάκρυνσης στην P είναι μεγαλύτερη από της G, με ποσοστά 82,16±13,90 % και 78,71±13,36 %, αντίστοιχα. Οι μονάδες G και P βρίσκονται σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, μέσης τιμής συγκέντρωσης και απομάκρυνσης και εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τη μονάδα C, η οποία έχει υψηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης (105,85±51,23) και χαμηλότερη μέση τιμή απομάκρυνσης (65,04±18,48 %).

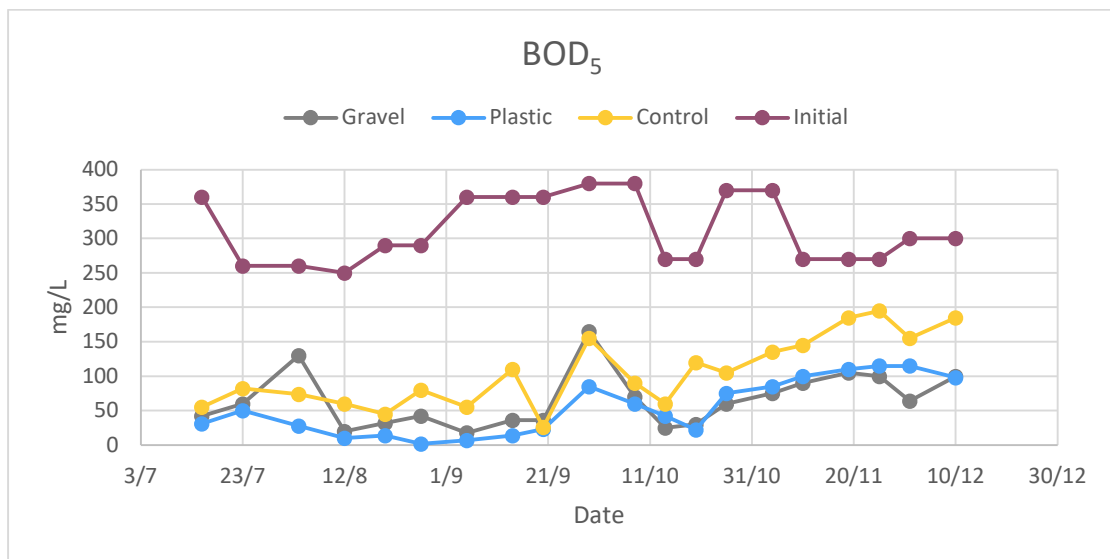
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4.2, η πλειονότητα των τιμών συγκεντρώσεων στις μονάδες G και P είναι χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις της μονάδας C. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 4.3 φαίνεται ότι τα ποσοστά απομάκρυνσης του BOD<sub>5</sub> στις μονάδες G και P ήταν αρκετά πιο αυξημένα, τις περισσότερες φορές, από αυτά που υπολογίστηκαν στην C. Επίσης, κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του πειράματος, οι συγκεντρώσεις και των τριών μονάδων ήταν λίγο χαμηλότερες σε σύγκριση με τους πιο χειμωνιάτικους μήνες. Η μονάδα G παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό απομάκρυνσης τον μήνα Οκτώβριο με 86,25% , η P τον Αύγουστο με 94,93% και η C τον Ιούλιο με 76,59%, ενώ και οι τρεις μονάδες ήταν λιγότερο αποδοτικοί στην απομάκρυνση του BOD τον μήνα Νοέμβρη με ποσοστά 67,62%, 64,16% και 42,27% αντίστοιχα.

Για την αξιοσημείωτη απομάκρυνση του BOD<sub>5</sub> στις μονάδες G και P, σε σύγκριση με τη μονάδα C, σημαντικό ρόλο έπαιξε η ύπαρξη βλάστησης στους δύο υδροβιότοπους. Τη βάση μετασχηματισμού και αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και άλλων ρύπων, αποτελεί η οργανική ύλη που παράγεται από τα μακρόφυτα κατά τη φωτοσύνθεση, η οποία δρα ως πηγή ενέργειας για την ετερότροφη δραστηριότητα μικροοργανισμών και μυκήτων (Kadlec and Wallace, 2009). Η διαθεσιμότητα οξυγόνου, ενισχύεται από την ύπαρξη βλάστησης, καθώς η ριζόσφαιρα των μακρόφυτων προάγουν αερόβια και αναερόβια περιβάλλοντα μεταφέροντας οξυγόνο στο νερό, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση ανάπτυξης μικροβιακών κοινοτήτων (Gupta et al., 2015).

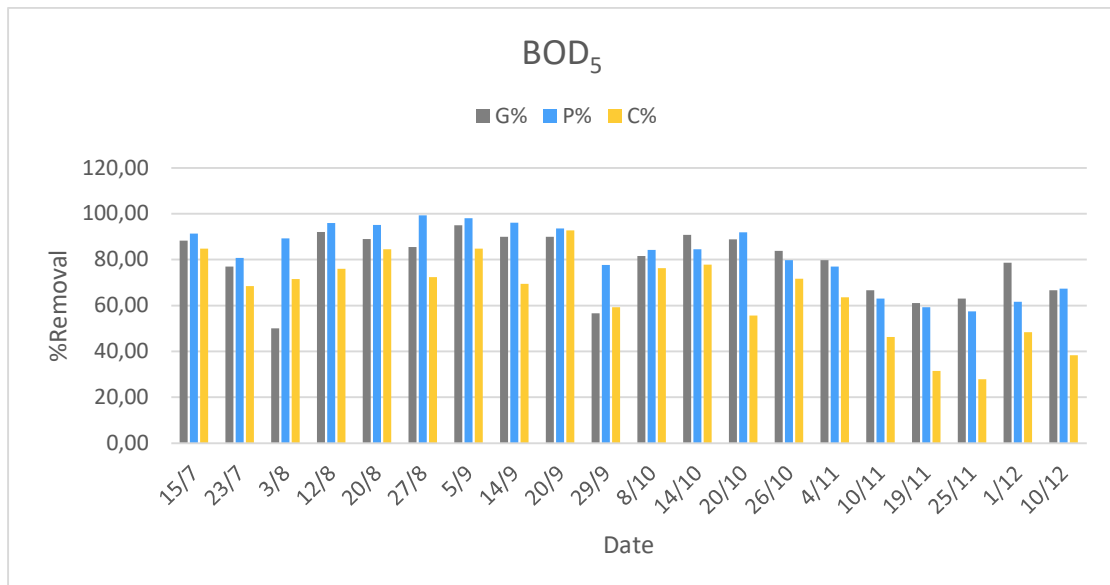
Σημαντικό ρόλο φαίνεται να έπαιξε και το πορώδες των συστημάτων καθώς φαίνεται να απέδωσε σημαντικά στην απομάκρυνση BOD<sub>5</sub> από την μονάδα P, η οποία διέθετε υπόστρωμα HDPE. Λόγω του υψηλού πορώδους που διέθετε, ενισχύθηκε η ανάπτυξη αερόβιων συνθηκών στο σύστημα (Carrasco-Acosta et al., 2019 ).

Η μέση απομάκρυνση του BOD στην μονάδα G, συμφωνούν και με προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση παρόμοιων συστημάτων, όπως των Stefanakis & Tsihritzis (2009, 2012) και των García-Ávila et al. (2019), με μέση απομάκρυνση 78% και 75,39% αντίστοιχα. Διαφορά στην απόδοση απομάκρυνσης BOD<sub>5</sub> με την παρουσία ή όχι βλάστησης σε ένα σύστημα υδροβιότοπων παρατήρησαν και οι Rahi et al. (2020), με τις φυτεμένες μονάδες να έχουν καλύτερες επιδόσεις.

**Διάγραμμα 4.2** Συγκέντρωση  $BOD_5$  εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.3** % Απομάκρυνση  $BOD_5$  των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.2 ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ COD

**Πίνακας 4.3** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης COD και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

COD	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	444,60±106,95	370,0-720,0	-	-
G (Gravel)	93,95 ± 56,39	45,0-282,0	77,84 ± 15,09	27,32-91,04
P (Plastic)	77,25 ± 37,32	26,0-190,0	82,26 ± 7,39	67,80-94,51
C (Control)	106,0 ± 41,15	60,0-206,0	75,36 ± 10,82	46,91-86,65

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.3 και τα διαγράμματα 4.4 και 4.5, φαίνεται ότι η μονάδα P είχε αρκετά χαμηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης COD ( $77,25 \pm 37,32$  mg/L) από τις μονάδες G και C, με μέσες συγκεντρώσεις  $93,95 \pm 56,39$  mg/L και  $106,0 \pm 41,15$  mg/L, αντίστοιχα. Είναι όμως εμφανές, και από το διάγραμμα, ότι και οι τρεις μονάδες εμφάνισαν σημαντική απομάκρυνση COD, με τη μονάδα P να ξεχωρίζει με μέση τιμή απομάκρυνσης  $82,26 \pm 7,39\%$ , ενώ τις μονάδες G και C να βρίσκονται σε παρόμοιο επίπεδο με μέσες τιμές απομάκρυνσης  $77,84 \pm 15,09\%$  και  $75,36 \pm 10,82\%$ , αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι και για τις τρεις μονάδες ο μήνας Αύγουστος ήταν αρκετά ευνοϊκός για την απομάκρυνση του COD με μέσες απομακρύνσεις G, P και C, 79,21%, 88,71 % και 78,94%. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε μια μικρή πτώση κατά τα τέλη Σεπτεμβρίου με αρχές Οκτώβρη, αλλά με επακόλουθη ανοδική αύξηση του ποσοστού απομάκρυνσης και εμφάνισης υψηλών ποσοστών και για τις τρεις μονάδες κατά τους χειμερινούς μήνες Νοέμβρη και Δεκέμβρη.

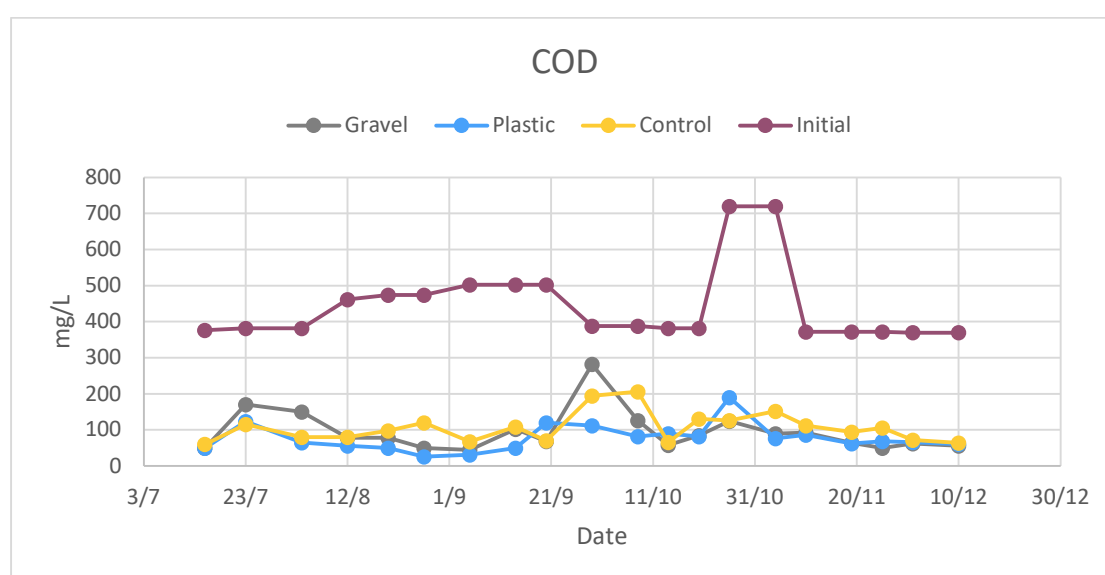
Σημαντικό παράγοντα απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών, αποτελεί η θερμοκρασία η οποία θεωρείται βέλτιστη στους 30°C (Akpor et al., 2013). Αυτό αιτιολογεί την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση COD που παρατηρήθηκε τους μήνες Ιούλιο & Αύγουστο, των οποίων οι μέσες θερμοκρασίες ήταν 27,7°C και 28,1°C αντίστοιχα. Σημαντικός επίσης παράγοντας μείωσης του COD κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αποτελεί και ο αυξημένος χρόνος παραμονής των λυμάτων (HRT) στη μονάδα, ο οποίος ευνοούσε την γρηγορότερη ανάπτυξη μικροοργανισμών.

Παρά τις χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες κατά τους μήνες Νοέμβρη και Δεκέμβρη, φαίνεται ότι τα συστήματα άρχιζαν να προσαρμόζονται στις συνθήκες και να σταθεροποιούνται. Η ριζόσφαιρα στις μονάδες G και P αυξήθηκε, γεγονός που συνέβαλλε στην αποτελεσματικότερη διήθηση των σωματιδίων και κατά συνέπεια την μείωση σωματιδιακής οργανικής ύλης στο λύμα (Dotro et al., 2015). Επίσης σημαντική θεωρήθηκε η παρουσία βλάστησης, αφού με την διαδικασία της φωτοσύνθεσης, παράγεται οργανική ύλη, η οποία λειτουργεί, ως πηγή ενέργειας για ετερότροφη δραστηριότητα μικροοργανισμών και μυκήτων (Kadlec and Wallace, 2009).

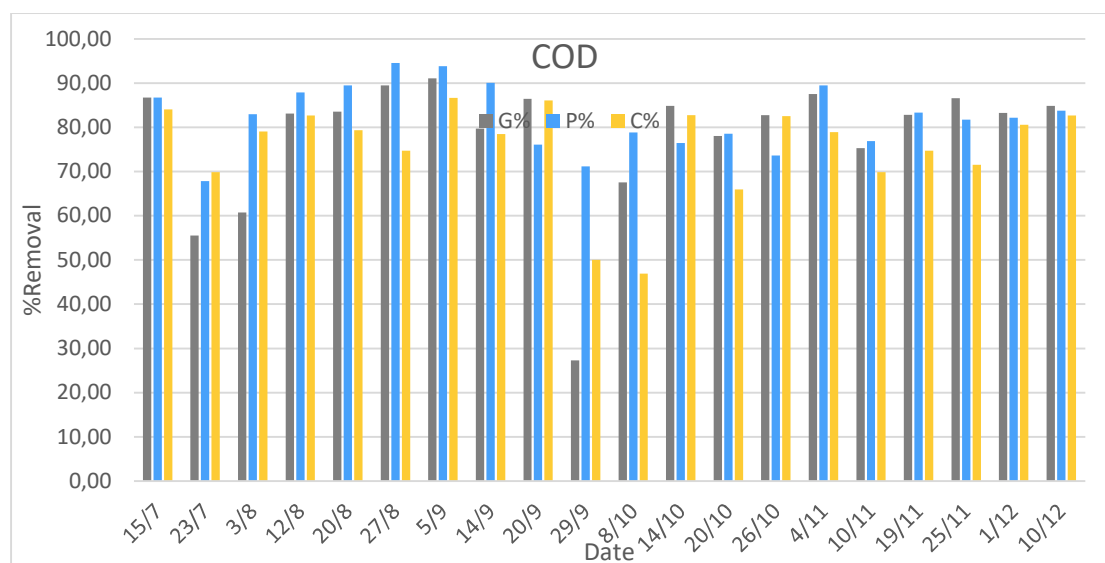
Η διαφορά αποτελεσματικότητας μεταξύ των μονάδων G και P, αλλά και η σημαντική απομάκρυνση στη μονάδα C, προσδίδεται στο εναλλακτικό μέσω υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε, το HDPE. Λόγω του υψηλού πορώδους του, το HDPE, φαίνεται να συνέβαλε αποτελεσματικά στη διαδικασία καθίζησης, αλλά παράλληλα επιτρέποντας την αυξημένη ανάπτυξη μικροοργανισμών στη επιφάνειά τους.

Τα αποτελέσματα των απομακρύνσεων του COD, είναι σύμφωνα και με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση παρόμοιων συστημάτων, όπως των Stefanakis & Tsihrizis (2009, 2012) και των Wu et al. (2019), με μέση απομάκρυνση 78% και 76,3% αντίστοιχα. Διαφορά στην απόδοση απομάκρυνσης COD με την παρουσία ή όχι βλάστησης σε ένα σύστημα υδροβιότοπων παρατήρησαν και οι Rahi et al. (2020), με τα φυτεμένα συστήματα να έχουν καλύτερη απομάκρυνση.

**Διάγραμμα 4.4** Συγκέντρωση COD εισροών και εκροών των μονάδων G, P και C.



**Διάγραμμα 4.5** % Απομάκρυνση COD των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.3 ΟΛΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ TOC

**Πίνακας 4.4** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης TOC και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

TOC	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	42,8 ± 14,2	25,3-66,4	-	-
G (Gravel)	23,6 ± 5,2	13,4-34,0	39,91 ± 19,40	4,0-72,5
P (Plastic)	22,2 ± 6,2	10,3-32,9	43,83 ± 20,55	3,9-78,9
C (Control)	14,1 ± 3,0	7,3-20,6	62,61 ± 16,46	36,1-85,0

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.4 και τα διαγράμματα 4.6 και 4.7, φαίνεται ότι η μονάδα C ήταν σημαντικά πιο αποτελεσματική στην απομάκρυνση του TOC. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή συγκέντρωσης του TOC στην μονάδα C ήταν  $14,1 \pm 3,0$  mg/L, σε αντίθεση με αυτές των G και P, οι οποίες ήταν  $23,6 \pm 5,2$  mg/L και  $22,2 \pm 6,2$  mg/L, αντίστοιχα. Ενώ παράλληλα και οι μέση τιμή απομάκρυνσης στη μονάδα C ήταν αρκετά υψηλότερη ( $62,61 \pm 16,46$  %), σε σύγκριση με αυτές της G ( $39,91 \pm 19,40$  %) και της P ( $43,83 \pm 20,55$  %).

Όσον αφορά τις μέσες μηνιαίες απομακρύνσεις φαίνεται ότι είναι υψηλότερες κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο, και για τις τρεις μονάδες συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες. Ενώ, αρκετά απότομη και αξιοσημείωτη αύξηση εμφανίζεται κατά το μήνα Δεκέμβριο με μέσο ποσοστό απομάκρυνσης για τις G, P και C, 59,12%, 63,97% και 67,21%, αντίστοιχα.

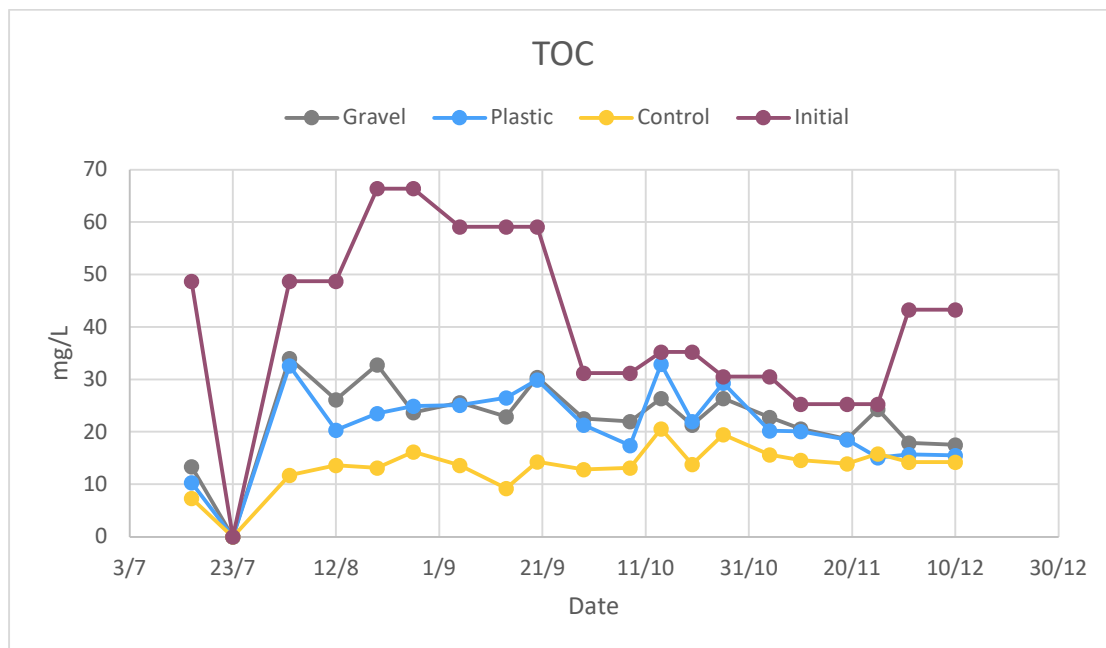
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι η ύπαρξη βλάστησης στο σύστημα δεν προσφέρει κάποιο όφελος στην απομάκρυνση TOC, ενώ φαίνεται να επιδράει και αρνητικά με τη πιθανότητα παροχής άνθρακα από τα μακρόφυτα, συγκρίνοντας την απόδοση της μονάδας C με τις G και P. Η μειωμένη απόδοση απομάκρυνσης TOC από τα φυτεμένα συστήματα G και P, σύμφωνα με Baptista et al. (2003), μπορεί να οφείλεται από έλλειψη μειωτικών θεικών και μεθανογόνων, σε σύγκριση με την μη φυτεμένη μονάδα C.

Σημαντικοί παράγοντες στην απομάκρυνση TOC, εμφανίζεται να έχει τόσο η θερμοκρασία, όσο και η μείωση του χρόνου παραμονής HRT αλλά και η ποσότητα και ο τρόπος τροφοδοσίας, με την μείωση απομάκρυνσης κατά τους μήνες Οκτώβρη-Νοέμβρη. Η μείωση αυτή μπορεί επίσης να οφείλεται και στην ξαφνική μείωση της συγκέντρωσης TOC στην εισροή των μηνών αυτών.

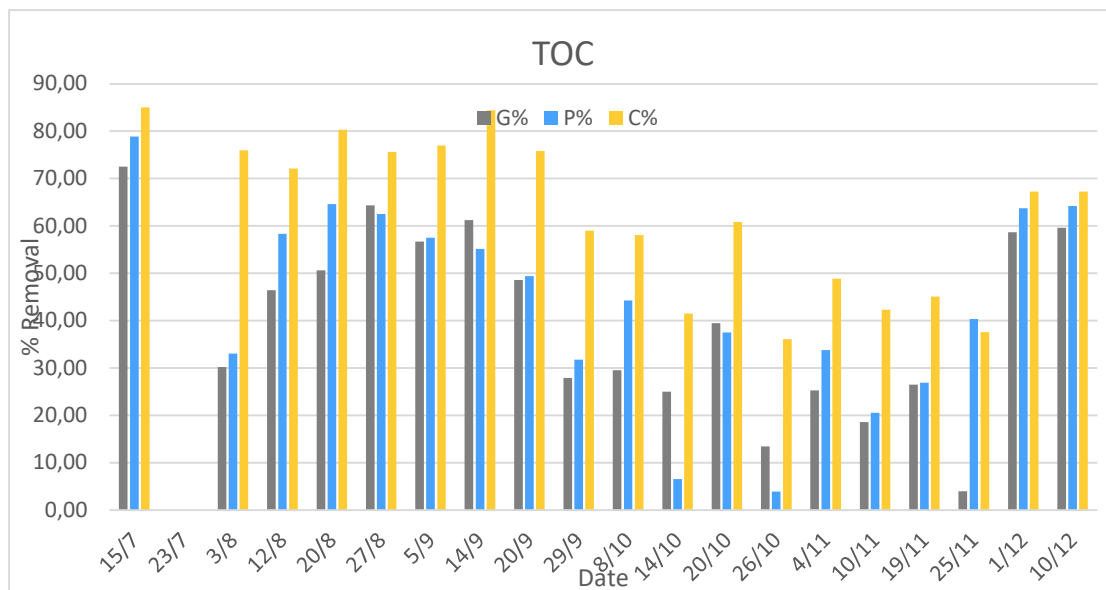
Σε παρόμοια έρευνα των Zhao et al. (2010), όπου πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποδόσεων φυτεμένων και μη φυτεμένων υδροβιότοπων, παρατηρήθηκε ότι τα συστήματα με την ύπαρξη βλάστησης είχαν μικρότερη απομάκρυνση από τα συστήματα χωρίς βλάστηση.



**Διάγραμμα 4.6** Συγκέντρωση TOC εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.7** % Απομάκρυνση TOC των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.4 ΟΛΙΚΟ ΑΖΩΤΟ TN

**Πίνακας 4.5** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης TN και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

TN	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	68,5 ± 6,9	56,0-78,0	-	-
G (Gravel)	20,8 ± 12,1	6,4-58,0	69,09 ± 18,45	17,14-91,79
P (Plastic)	17,0 ± 11,1	2,8-35,0	74,89 ± 16,44	44,26-96,41
C (Control)	42,9 ± 16,7	16,0-77,0	36,86 ± 26,44	(-26,23)-73,33

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.5 και τα διαγράμματα 4.8 και 4.9, η μονάδα P φαίνεται να είχε την καλύτερη απόδοση απομάκρυνσης TN, με τη μονάδα G να ακολουθεί με εξίσου σημαντική απομάκρυνση. Η μονάδα C εμφανίζεται να έχει σημαντική αδυναμία απομάκρυνσης καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες G και P, είχαν αρκετά χαμηλότερες μέσες τιμές συγκέντρωσης, 20,8 ± 12,1 mg/L και 17,0 ± 11,1 mg/L αντίστοιχα, οπότε και υψηλότερες μέσες τιμές απομάκρυνσης, 69,09 ± 18,45 % και 74,89 ± 16,44 % αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι είχα και οι δύο τα υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης από τα τέλη Αυγούστου, ενώ με το πέρασμα των μηνών φαίνεται η σταδιακή μείωση της απομάκρυνσης, με εξαίρεση τις μετρήσεις στις 29/9, κατά την οποία οι συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν αρκετά πιο αυξημένες, πιθανότητα λόγω κάποιου πειραματικού σφάλματος κατά τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων τους.

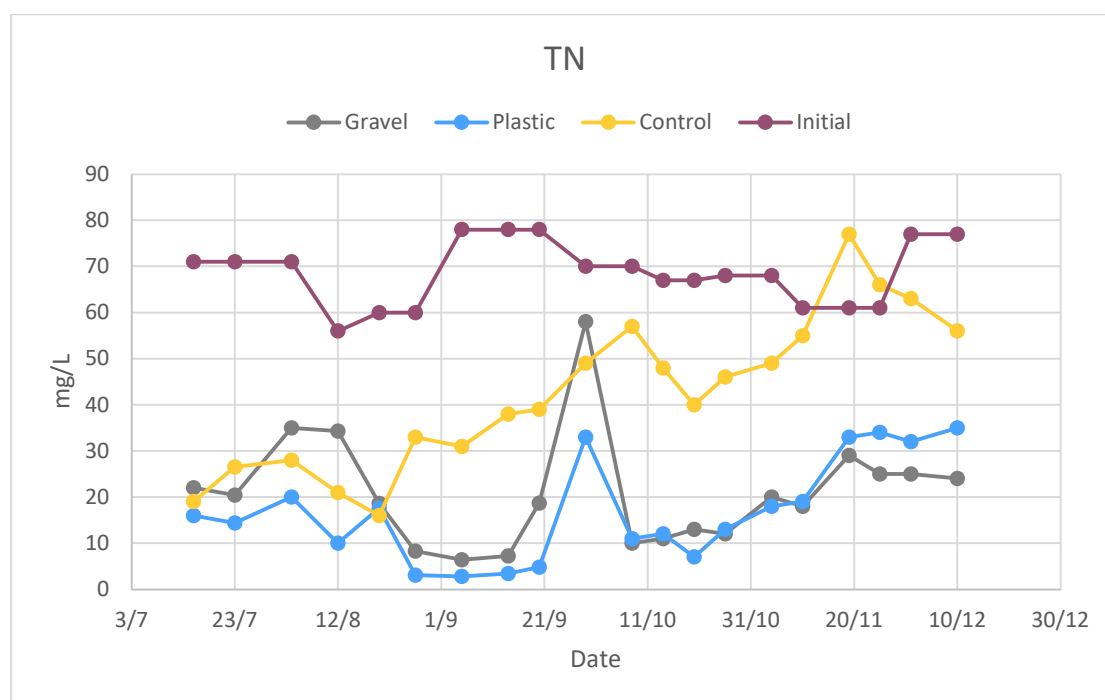
Η μονάδα C, από την άλλη, εμφανίζει αρκετά υψηλή μέση συγκέντρωση 42,9 ± 16,7 mg/L, και χαμηλή μέση τιμή απομάκρυνσης 36,86 ± 26,44 %. Ενώ από τα διαγράμματα φαίνεται ότι τους πρώτους μήνες είχε αρκετά καλή απομάκρυνση TN, στη συνέχεια παρατηρείται καθοδική πορεία με αποκορύφωμα τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις 19/11 και 25/11, κατά τις οποίες η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην μονάδα C ξεπέρασαν αρκετά τη συγκέντρωση της αρχικής εισροής (Initial).

Η παρουσία βλάστησης στις μονάδες G και P, φαίνεται να συνέβαλλε αποτελεσματικά στην απομάκρυνση του ολικού αζώτου με την εμφάνιση αυξημένων διεργασιών νιτροποίησης και απονιτροποίησης που προκύπτουν από την αναπνοή των φυτών, παρέχοντας αερόβιες συνθήκες στο σύστημα και κατά συνέπεια ανάπτυξη μικροοργανισμών ριζών (Saharimoghaddam et al., 2019). Σύμφωνα με τους (Chen et al., 2019), οι αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες που παρέχονται από τα στρώματα και τις ρίζες των φυτών στους 30 - 35 °C, ευνοούν τη διαδικασία απομάκρυνσης των αζωτούχων ενώσεων. Επίσης στις μονάδες αυτές, τα μακρόφυτα παρέχουν άνθρακα στα συστήματα ευνοώντας την διαδικασία της απονιτροποίησης και τη μείωση της ταχύτητας ροής (Nymazal, 2011).

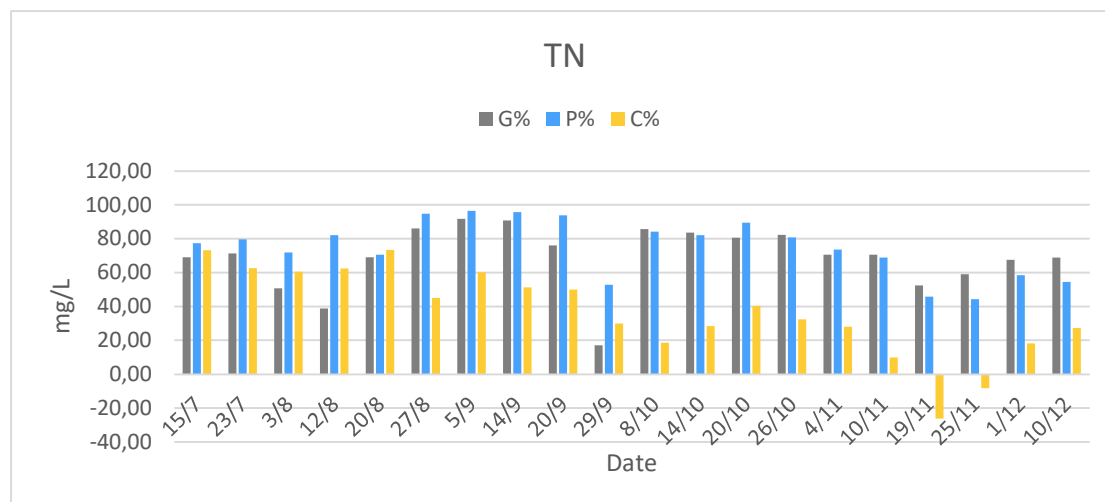
Ακόμα, φαίνεται να συνεισφέρει αρκετά και η χρήση υποστρώματος από HDPE, συγκρίνοντας τις μονάδες G και P, αλλά παρατηρώντας και την απομάκρυνση στη μονάδα C. Το υψηλό πορώδες των HDPE, συνεισφέρει στην εξατμισοδιαπνοή, διαδικασία αρκετά σημαντική στην απομάκρυνση ολικού αζώτου ( Liu et al. , 2019).

Τέλος, σημαντικό ρόλο, όσο αναφορά την απομάκρυνση φαίνεται να έπαιξαν η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής, αφού οι τιμές και των δύο αυτών παραγόντων ήταν υψηλές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, κάτι που επηρέαζε θετικά και την απομάκρυνση του αζώτου, ενώ με τη μείωση τους τους υπόλοιπους μήνες φαίνεται να μειώθηκαν και οι επιδόσεις των συστημάτων.

**Διάγραμμα 4.8** Συγκέντρωση TN εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.9** % Απομάκρυνση TN των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.5 ΑΜΜΩΝΙΑΚΟ ΑΖΩΤΟ NH<sub>4</sub>-N

**Πίνακας 4.6** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης NH<sub>4</sub>-N και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

NH <sub>4</sub> -N	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	41,6 ± 8,1	28,50-55,10	-	-
G (Gravel)	13,8 ± 9,1	0-34,50	68,00 ± 20,09	23,33-100
P (Plastic)	10,6 ± 8,0	0,30-21,0	76,37 ± 17,49	50,72-99,01
C (Control)	27,7 ± 12,8	8,50-48,80	34,34 ± 26,22	(-5,40)-70,18

Από το πίνακα 4.6 και τα διαγράμματα 4.10 και 4.11, φαίνεται ότι η απόδοση απομάκρυνσης NH<sub>4</sub>-N ήταν αρκετά υψηλή στην μονάδα P, σημαντικά καλή στην G, ενώ και πάλι η μονάδα C εμφάνισε αδυναμία στην απομάκρυνση NH<sub>4</sub>-N. Επίσης, παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων TN, γεγονός που επαληθεύει την ορθότητα τους και την μη εμφάνιση σφαλμάτων.

Οι μονάδες G και P, εμφανίζεται να έχουν χαμηλές μέσες τιμές συγκέντρωσης NH<sub>4</sub>-N, 13,8 ± 9,1 mg/L και 10,6 ± 8,0 mg/L αντίστοιχα, όπως και υψηλές μέσες απομακρύνσεις, 68,00 ± 20,09 & και 76,37 ± 17,49 % αντίστοιχα. Παρατηρώντας, επίσης τα διαγράμματα, φαίνεται ότι είχαν τις υψηλότερες απομακρύνσεις κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο, ενώ με το πέρασμα των μηνών τα ποσοστά των απομακρύνσεων μειώνονταν με αργό ρυθμό, αλλά παραμένοντας σε ένα καλό επίπεδο.

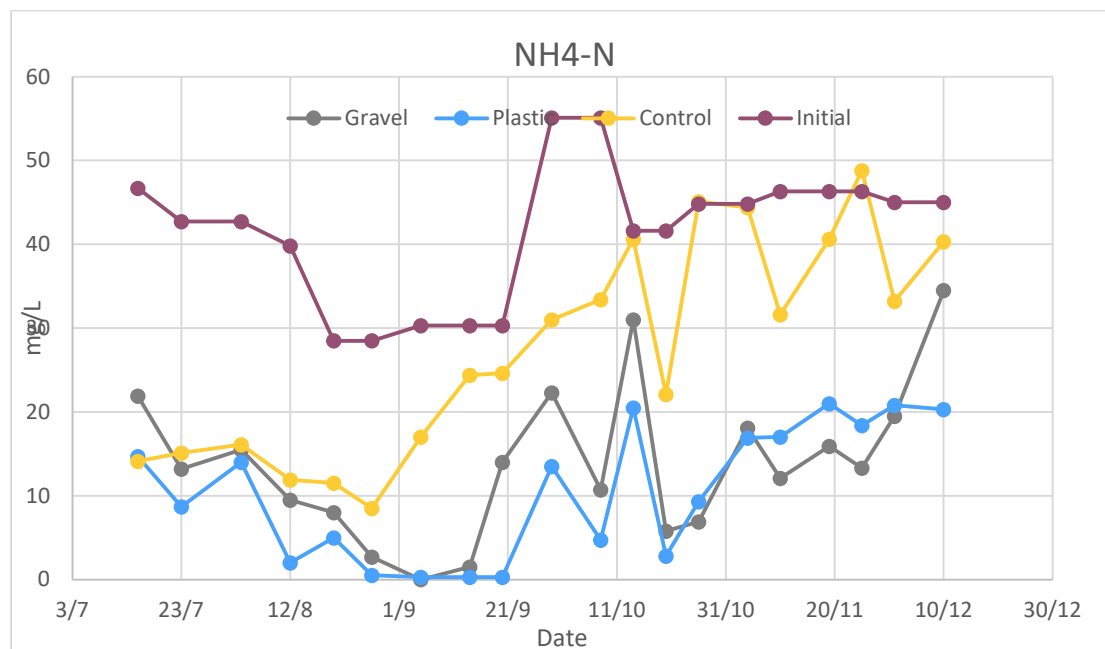
Όσον αφορά τη μονάδα C, εμφάνισε κάποια όχι και τόσο καλή μέση συγκέντρωση 27,7 ± 12,8 mg/L και αρκετά χαμηλή μέση απομάκρυνση 34,34 ± 26,22 %. Επίσης, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρήθηκε αρκετά καλή απόδοση απομάκρυνσης NH<sub>4</sub>-N, από τον Σεπτέμβριο μέχρι το πέρας του πειράματος, τα ποσοστά της απομάκρυνσης του ρύπου ήταν πολύ χαμηλά έως και μηδενικά.

Με βάση τα παραπάνω, φαίνεται ότι τον κύριο ρόλο απομάκρυνσης της αμμωνίας τον είχε η παρουσία βλάστησης στα συστήματα. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης NH<sub>4</sub>-N είναι η νιτροποίηση που λαμβάνει χώρα στο σύστημα (Vymazal, 2007; Rasheed et al. , 2014). Στις μονάδες G και P τα μακρόφυτα μεταφέρουν μέσω των ριζών τους οξυγόνο, ευνοώντας την ανάπτυξη νιτροποιητικών βακτηρίων για την οξείδωση της αμμωνίας. Στη μονάδα C ο μόνος τρόπος εισροής οξυγόνου στο σύστημα ήταν κατά τον τρόπο τροφοδοσίας του. Ενώ, από τη σύγκριση της G και της P μονάδας, το πορώδες του HDPE φαίνεται να ενίσχυσε τη διάχυση του οξυγόνου, επιφέροντας καλύτερα αποτελέσματα.

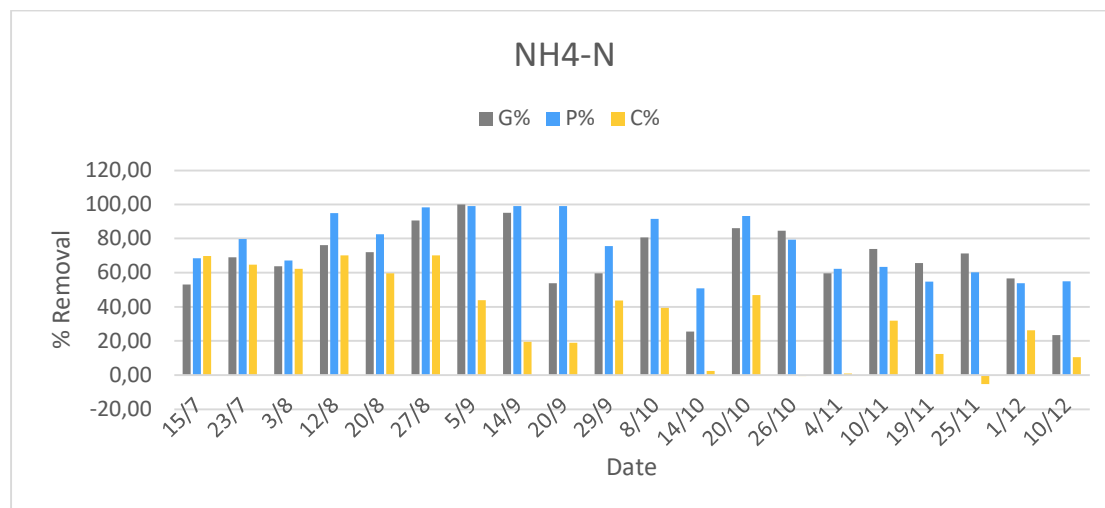
Τέλος, η σταδιακή μείωση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης NH<sub>4</sub>-N, φαίνεται να επηρεάστηκε από τη θερμοκρασία, η οποία αρχικά ήταν υψηλότερη ενώ σταδιακά μειωνόταν, από την μείωση του χρόνου παραμονής, αλλά και από την τροφοδοσία των

συστημάτων η οποία από 1,5 L/d τους καλοκαιρινούς μήνες, αυξήθηκε στα 8 L/3d ( με δύο μέρες ανάπαυσης).

**Διάγραμμα 4.10** Συγκέντρωση  $NH_4-N$  εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.11** % Απομάκρυνση  $NH_4-N$  των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.6 ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ $NO_3-N$

Οι συγκεντρώσεις  $NO_3-N$  και στις τρεις μονάδες, όπως φαίνεται και στο παράρτημα Δ, κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, εμφάνιζαν τιμές  $<5$  mg/L. Με τη διαδικασία της νιτροποίησης, η οποία πραγματοποιείται λόγω των αερόβιων συνθηκών που επικρατούν στο σύστημα VF CW, η  $NH_4-N$  μεταφέρεται σε  $NO_3-N$ . Με την απονιτροποίηση, η οποία λαμβάνει χώρα στην περίπτωση όπου η οργανική ύλη είναι διαθέσιμη σε αναερόβιες συνθήκες, τα  $NO_3-N$  μετατρέπονται σε αέριο άζωτο και ιόντα αζώτου (Rasheed et al. , 2014).

Από τα πειραματικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος, επικρατούσαν και ανοξικές συνθήκες στα κατώτερα στρώματα των μονάδων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μετατροπή των  $\text{NO}_3\text{-N}$ , που παράγονταν κατά την νιτροποίηση, σε αέριο και ιόντα αζώτου.

#### 4.3.7 ΟΛΙΚΟΣ ΦΩΣΦΟΡΟΣ TP

**Πίνακας 4.7** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης TP και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης του.

TP	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	4,091 ± 0,655	3,243-5,181	-	-
G (Gravel)	2,120 ± 0,477	1,381-3,095	46,91 ± 14,43	21,43-71,50
P (Plastic)	2,223 ± 0,617	1,307-3,354	43,98 ± 19,01	9,21-73,03
C (Control)	2,705 ± 0,853	1,479-4,149	31,61 ± 26,84	(-21,77)-67,13

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.7 και τα διαγράμματα 4.12 και 4.13, φαίνεται ότι και οι τρεις μονάδες G,P και C, δεν είχαν σημαντικές αποδόσεις στην απομάκρυνση TP. Συγκριτικά, οι G και P εμφάνιζαν λίγο καλύτερες κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος, από τη μονάδα C.

Οι μονάδα G εμφάνισε λίγο χαμηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης ( $2,120 \pm 0,477$  mg/L), και λίγο υψηλότερη μέση τιμή απομάκρυνσης ( $46,91 \pm 14,43$  %), σε σύγκριση με τη P, της οποίας η μέση τιμή συγκέντρωσης ήταν  $2,223 \pm 0,617$  mg/L ενώ η μέση τιμή απομάκρυνσης ήταν  $43,98 \pm 19,01$  %. Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι και για τις δύο μονάδες ήταν ευνοϊκοί οι καλοκαιρινή μήνες, αφού εμφάνισαν τις υψηλότερες απομακρύνσεις. Ενώ, είναι εμφανές ότι από τον Οκτώβρη και μετά οι απομακρύνσεις ήταν εμφανώς χαμηλότερες, με τη μονάδα G να είναι λίγο πιο αποδοτική.

Η μονάδα C, που όπως φαίνεται και από το πίνακα 4.7 είχε μέση τιμή συγκέντρωσης  $2,705 \pm 0,853$  mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης  $31,61 \pm 26,84$  %, είχε και αυτή κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης. Στη συνέχεια, κατά τον μήνα Οκτώβρη εμφάνισε μεγάλες συγκεντρώσεις TP, οι οποίες ξεπέρασαν και τις συγκεντρώσεις της εισροής, ενώ στην συνέχεια παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση στις ποσοστιαίες απομακρύνσεις.

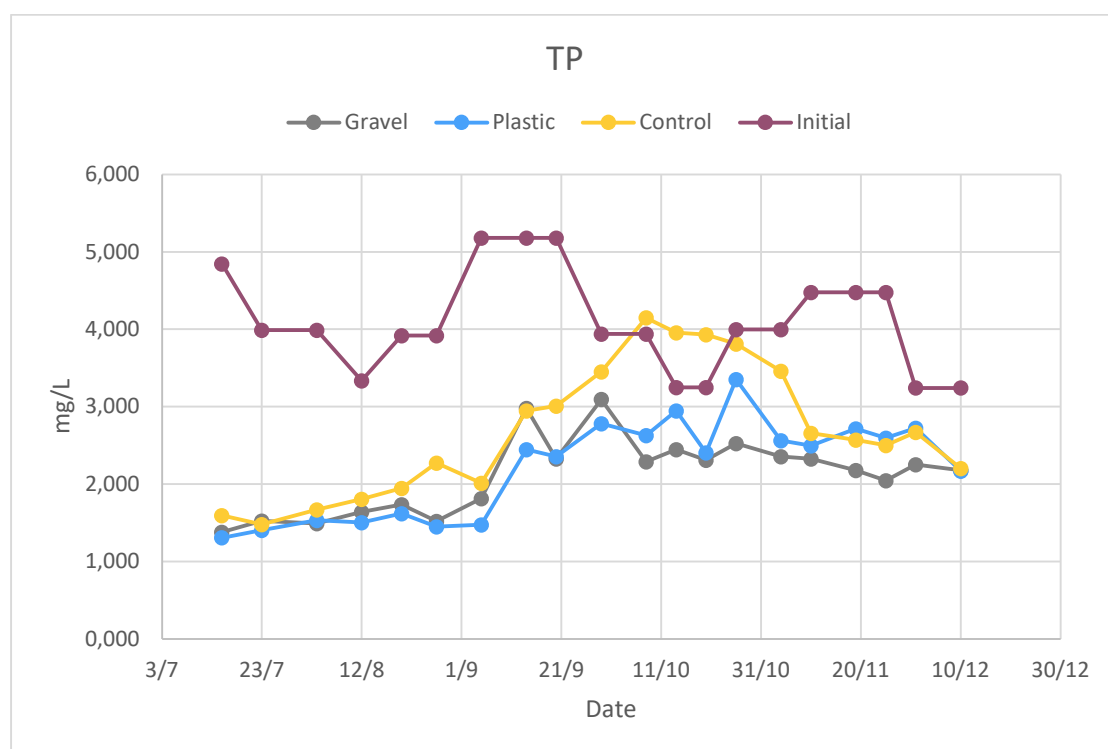
Όπως συμπεραίνεται και από τα παραπάνω, κύριο ρόλο στην απομάκρυνση TP, αποτέλεσε η παρουσία βλάστησης. Τα μακρόφυτα προσλαμβάνουν φώσφορο και τον συγκρατούν στην βιομάζα τους, ενώ ανάλογα το είδος των μακρόφυτων εξαρτάται η ποσότητα του



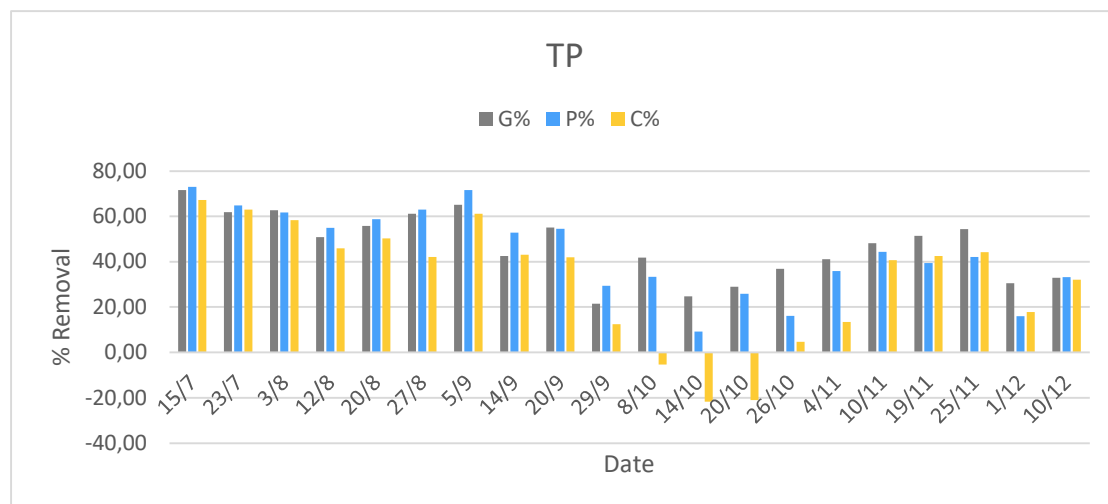
φωσφόρου που προσλαμβάνεται (Maucieri et al. , 2020). Στις μονάδες G και P, η χρήση του *Phragmites Australis*, φαίνεται να ήταν αρκετά αποτελεσματική στην απομάκρυνση TP.

Η χρήση χαλικιού ως υπόστρωμα στην μονάδα G, παρά την μικρή επιφάνεια σε σύγκριση με τον όγκο τους για την προσρόφηση του φωσφόρου, φαίνεται να ήταν αποτελεσματικότερη από τη χρήση HDPE. Σημαντικό, επίσης, ρόλο φαίνεται να αποτέλεσε και η θερμοκρασία με την σταδιακή μείωση της με το πέρασμα των μηνών, παράλληλα με τη σταδιακή μείωση της απομάκρυνσης του TP. Αυτό συμβαίνει, λόγω της βλάβης των φυτικών ιστών με τη μείωση της θερμοκρασίας, και κατά συνέπεια την αδυναμία πρόσληψης του φωσφόρου (Wei et al. , 2017; Mu et al. , 2020). Ενώ και η μείωση του HRT, με την αύξηση της τροφοδοσίας, φαίνεται να επηρέασε την απομάκρυνση TP, αφού θεωρείται μια σημαντική παράμετρος αφαίρεσης του ( Shingare et al., 2019 ).

**Διάγραμμα 4.12** Συγκέντρωση TP εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.13** % Απομάκρυνση TP των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.8 ΦΩΣΦΟΡΙΚΑ $PO_4^{3-}-P$

**Πίνακας 4.8** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης  $PO_4^{3-}-P$  και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης τους.

$PO_4^{3-}-P$	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισροή	2,483 ± 0,498	1,821-3,786	-	-
G (Gravel)	1,714 ± 0,278	1,247-2,193	27,70 ± 19,85	(-10,32)-65,95
P (Plastic)	1,810 ± 0,408	1,241-2,602	23,07 ± 26,80	(-42,89)-65,80
C (Control)	2,147 ± 0,493	1,439-2,925	9,49 ± 28,50	(-38,56)-60,22

Από τον πίνακα 4.8 και τα διαγράμματα 4.14 και 4.15 παρατηρείται, ότι και οι τρεις μονάδες είχαν χαμηλή απόδοση απομάκρυνσης  $PO_4^{3-}-P$ . Οι μονάδες Οι μονάδες G και P φαίνεται ότι ήταν λίγο πιο αποτελεσματικές από τη μονάδα C, ενώ όλα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των  $PO_4^{3-}-P$  συσχετίζονταν με αυτά του TP, γεγονός που επαλήθευε την ορθότητα τους και την μη εμφάνιση κάποιου σφάλματος.

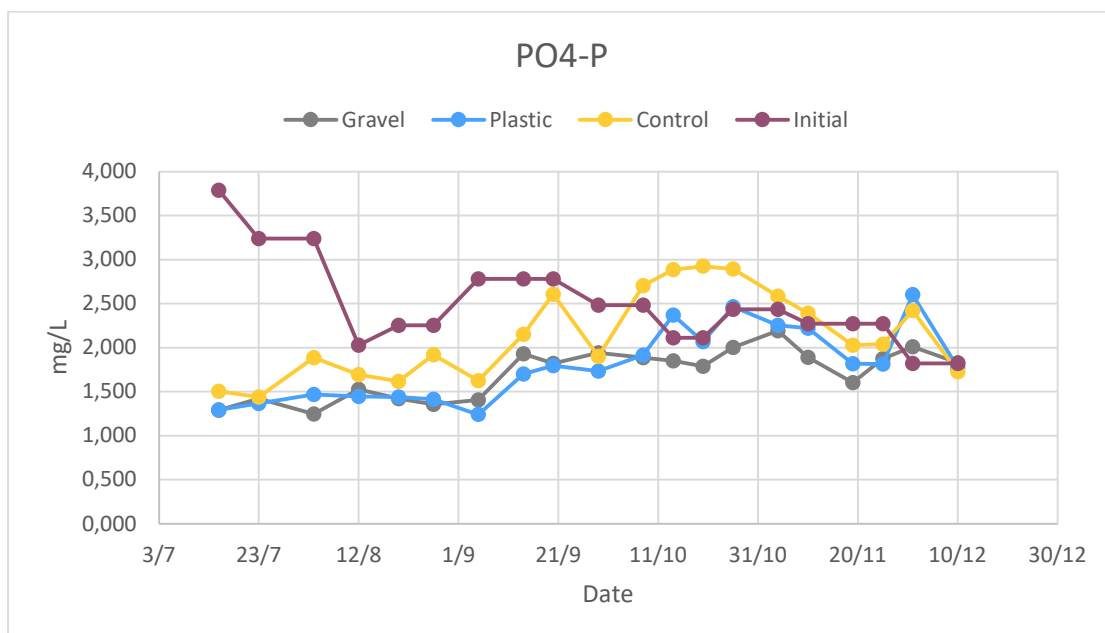
Η μονάδα G με μέση τιμή συγκέντρωσης 1,714 ± 0,278 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 27,70 ± 19,85 %, φάνηκε να ήταν ελάχιστα πιο αποδοτική από την μονάδα P, η οποία εμφάνισε μέση τιμή συγκέντρωσης 1,810 ± 0,408 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 23,07 ± 26,80 %. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τους καλοκαιρινούς μήνες συνέβαλαν σημαντικά στην απομάκρυνση  $PO_4^{3-}-P$ , ενώ από τον Οκτώβρη και μετά φαίνεται να μειώνεται σημαντικά, εμφανίζοντας μέχρι και μεγάλη συγκέντρωση  $PO_4^{3-}-P$  σε κάποιες περιπτώσεις.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασε και η μονάδα C, με μέση τιμή συγκέντρωσης 2,147 ± 0,493 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 9,49 ± 28,50 %, η οποία τους πρώτους καλοκαιρινούς μήνες εμφάνισε κάποια αρκετά καλή απομάκρυνση, στη συνέχεια, όμως, μειώθηκε σημαντικά με τις περισσότερες τιμές των συγκεντρώσεων να φτάνουν και να ξεπερνούν κατά πολύ τις συγκεντρώσεις των εισροών (Initial).

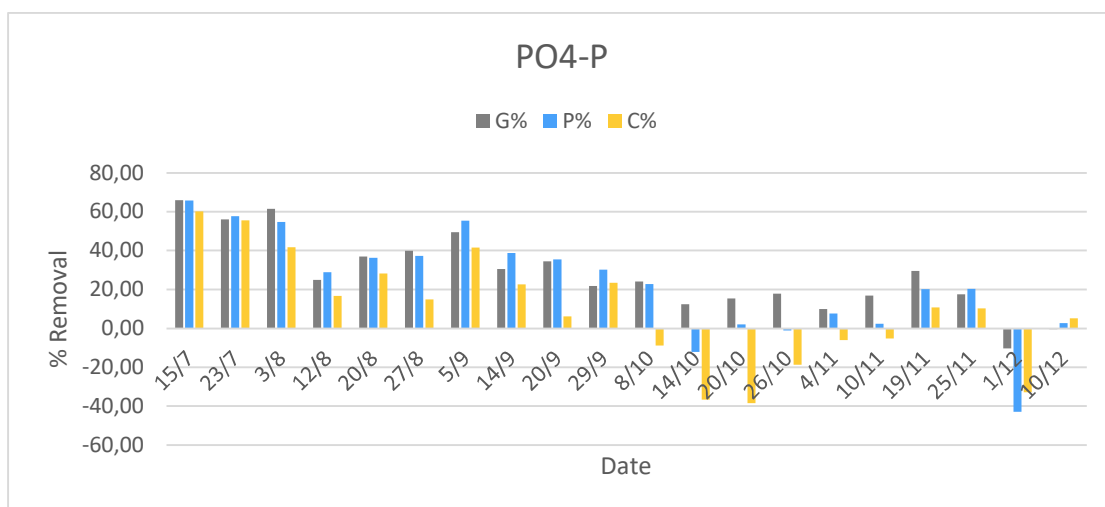
Η παρουσία βλάστησης στις μονάδες G και P, συνέβαλλε σημαντικά στην απομάκρυνση  $PO_4^{3-}-P$ , μέσω της πρόσληψης τους, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ με τη μείωση της θερμοκρασίας φαίνεται η αδυναμία των μονάδων στην αφαίρεση τους. Επίσης το χαλίκι φαίνεται να είχε καλύτερες αποδόσεις, όσο αναφορά την απομάκρυνση του συγκεκριμένου ρύπου, σε σύγκριση με το HDPE.

Η μονάδα C παρουσίασε αδυναμία στην απομάκρυνση  $PO_4^{3-}-P$ , ενώ αρκετές φορές εμφάνισε υψηλές συγκεντρώσεις του ρύπου, με την ύπαρξη της πιθανότητας ευτροφισμού στη μονάδα.

**Διάγραμμα 4.14** Συγκέντρωση  $PO_4^{3-}$  -P εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



**Διάγραμμα 4.15** % Απομάκρυνση  $PO_4^{3-}$  -P των μονάδων G, P και C.



#### 4.3.9 pH

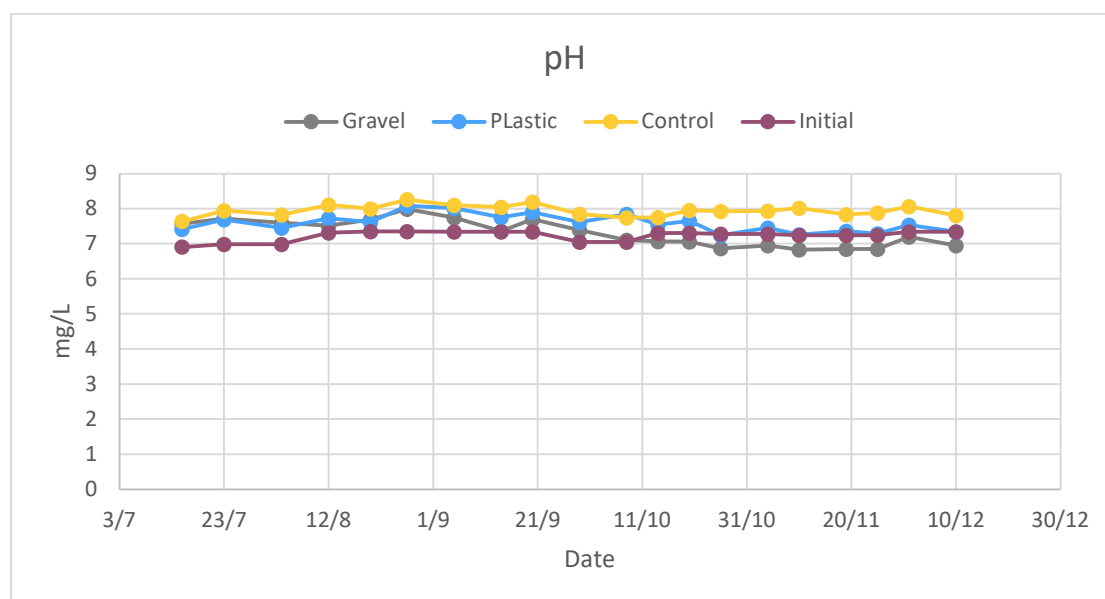
**Πίνακας 4.9** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης pH.

pH	Μέση τιμή Συγκέντρωσης	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης
Εισροή	7,23 ± 0,15	6,91-7,35
G (Gravel)	7,30 ± 0,37	6,83-7,99
P (Plastic)	7,59 ± 0,25	7,24-8,08
C (Control)	7,94 ± 0,16	7,64-8,26

Από τον πίνακα 4.9 και το διάγραμμα 4.16 φαίνεται ότι το pH και στις τρεις μονάδες G,P και C αυξήθηκε ελαφρώς σε σύγκριση με το pH της εισροής το οποίο είχε μια μέση τιμή συγκέντρωσης 7,23 ± 0,15 mg/L. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στη μονάδα C με μέση τιμή συγκέντρωσης 7,94 ± 0,16 mg/L και αμέσως μετά την μονάδα P με μέση τιμή συγκέντρωσης 7,59 ± 0,25 mg/L. Στην μονάδα G παρατηρήθηκε μικρότερη αύξηση με μέση τιμή συγκέντρωσης 7,30 ± 0,37 mg/L. Τα pH και των τριών μονάδων παρουσίαζαν μια ελαφριά αλκαλικότητα, με τη μονάδα C να διατηρεί αυτή την αλκαλικότητα καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ η G και η P από τα μέσα Οκτώβρη εμφανίζουν μια μικρή μείωση του pH.

Σύμφωνα με τους (Morari et al. , 2009), η αύξηση του pH στις εκροές, είναι αποτέλεσμα των διαδικασιών αερόβιας βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης στα λύματα, κατά τις οποίες γίνεται παραγωγή υδροξειδίων και ανθρακικών ανιόντων. Η βλάστηση στις μονάδες G και P, βοήθησε στην ελαχιστοποίηση της αύξηση του pH, αφού η παρουσία τους σε ένα υγροβιότοπο συμβάλλει στην ρύθμιση του pH των λυμάτων (Morari et al. , 2009).

**Διάγραμμα 4.16** Τιμές pH εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



#### 4.3.10 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΗΜΟΤΗΤΑ EC

**Πίνακας 4.10** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης EC.

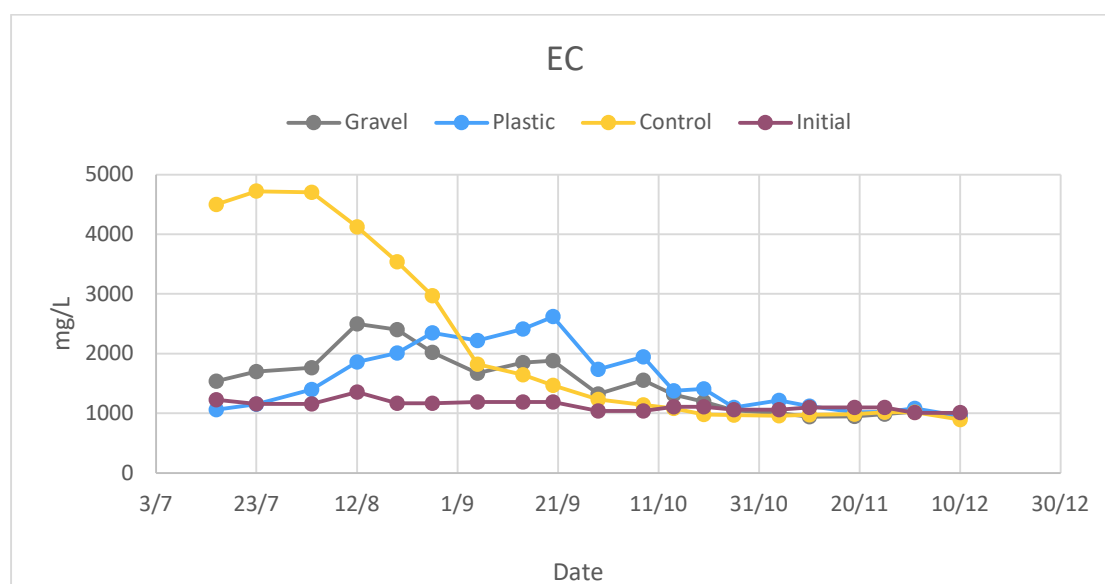
EC	Μέση τιμή ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Εισροή	$1127 \pm 84$	1012-1358
G (Gravel)	$1481 \pm 487$	946-2500
P (Plastic)	$1553 \pm 542$	955-2620
C (Control)	$2038 \pm 1446$	896-4720

Από τον πίνακα 4.10 και το διάγραμμα 4.17 φαίνεται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε και στα τρία συστήματα. Η μονάδα C με μέση τιμή  $2038 \pm 1446 \mu\text{S}/\text{cm}$ , παρουσίασε μεγάλη αύξηση EC κατά τους πρώτους μήνες διεξαγωγής του πειράματος, ενώ στη συνέχεια μειώθηκε σημαντικά με τα τιμές της να φτάνουν τις τιμές της αρχικής εισροής και να σταθεροποιούνται από τον Οκτώβρη και μετά. Επίσης και οι μονάδες G και P είχαν μια σημαντική αύξηση κατά τους πρώτους μήνες, με τις τιμές και αυτών να φτάνουν τις τιμές των εισροών από τον Οκτώβρη και μετά.

Όπως και στη περίπτωση του pH, έτσι και η EC αυξάνεται κατά την επεξεργασία, λόγω των αερόβιων διαδικασιών βιοαποδόμησης της οργανικής ύλης, κατά τις οποίες γίνεται παραγωγή υδροξειδίων και ανθρακικών ανιόντων (Morari et al. , 2009). Στις μονάδες G και P φαίνεται ότι η βλάστηση βοηθάει στην αντιμετώπιση της αύξησης της EC με την ικανότητα προσρόφησης του απαιτούμενου νερού και θρεπτικών. Η ικανότητα αυτή επαληθεύεται από την αρκετά μειωμένη απόδοση της μονάδας C να διατηρήσει την EC σε χαμηλά επίπεδα.

Ενώ και στις τρεις μονάδες η EC είναι πιο αυξημένη κατά τους πιο θερμούς μήνες, φαίνεται ότι με την μείωση της θερμοκρασίας και την μείωση του HRT, με την αύξηση της τροφοδοσίας, και οι τρεις μονάδες εμφάνισαν αυξημένη αντιμετώπιση του προβλήματος με την EC να παραμένει σε καλά επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να δικαιολογηθούν τόσο από παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις και η αλλαγή HRT, αλλά και την σταθεροποίηση των συστημάτων με το πέρασμα των μηνών, αφού κατά τους πρώτους μήνες βρισκόταν σε αρχική φάση προσαρμογής.

**Διάγραμμα 4.17** Τιμές EC εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.





#### 4.3.11 ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ TSS

**Πίνακας 4.11** Μέση τιμή και εύρος τιμών συγκέντρωσης TSS και μέση τιμή και εύρος τιμών απομάκρυνσης τους.

TSS	Μέση τιμή Συγκέντρωσης (mg/L)	Εύρος τιμών Συγκέντρωσης (mg/L)	Μέση τιμή Απομάκρυνσης (%)	Εύρος Τιμών Απομάκρυνσης (%)
Εισορή	136,278 ± 65,58	54,67-260,0	-	-
G (Gravel)	13,609± 11,45	0,67-38,67	86,14± 16,13	39,09-99,68
P (Plastic)	18,826± 18,99	4,0-89,33	83,19± 15,30	43,90-98,08
C (Control)	28,148± 16,06	5,30-60,0	74,11± 19,12	15,86-97,46

Παρατηρώντας τον πίνακα 4.11 και το διάγραμμα 4.18, φαίνεται ότι και οι τρεις μονάδες G,P και C, ήταν αρκετά αποτελεσματικές στην απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών. Η μονάδα G, φαίνεται να ήταν η πιο αποτελεσματική με μέση τιμή συγκέντρωσης 13,609± 11,45 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 86,14± 16,13 %. Σε αρκετά καλά επίπεδα βρισκόταν και η μονάδα P, με μέση τιμή συγκέντρωσης 18,826± 18,99 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 83,19± 15,30 %, ενώ η μονάδα C εμφάνισε κάποια αδυναμία στην απομάκρυνση TSS, σε σύγκριση τις προαναφερθείσας μονάδες με μέση τιμή συγκέντρωσης 28,148± 16,06 mg/L και μέση τιμή απομάκρυνσης 74,11± 19,12 %.

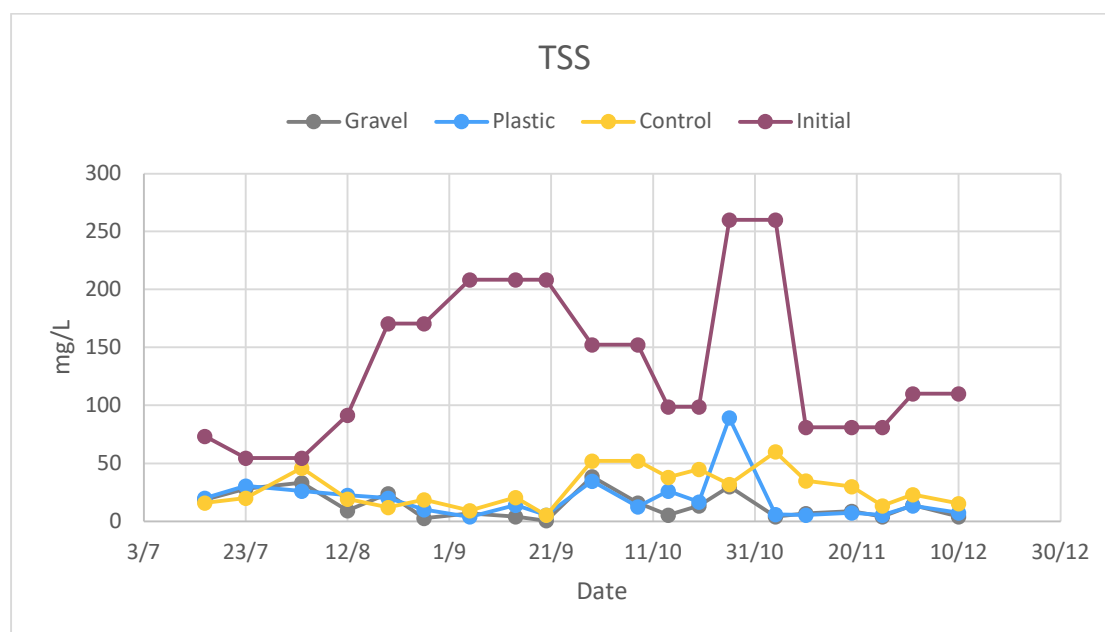
Από τα αποτελέσματα των μονάδων, παρατηρείται ότι ενώ τον πρώτο μήνα οι απομακρύνσεις ήταν αρκετά χαμηλές, εμφανίστηκε ξαφνική άνοδος απόδοσης τους μήνες Αύγουστο-Σεπτέμβρη. Κατά τον Οκτώβρη επήλθε μικρή μείωση απόδοσης, κυρίως για τη μονάδα C, αλλά κατά τους μήνες Νοέμβρη-Δεκέμβρη οι αποδόσεις των συστημάτων G και P, φαίνεται να σταθεροποιήθηκαν, με την μονάδα C να συνεχίζει να εμφανίζει πιο μειωμένες απομακρύνσεις.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται ότι η παρουσία βλάστησης στις μονάδες G και P επηρέασε θετικά στην απομάκρυνση TSS. Το δίκτυο των βακτηρίων που σχηματίζεται στη ριζόσφαιρα του μακρόφυτου, λειτουργεί ως ισχυρός παράγοντας διήθησης και αφομοίωσης για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών ( Carrasco-Acosta et al., 2019 ). Σημαντικό ρόλο φαίνεται να έπαιξε και το πληρωτικό μέσο στις μονάδες, αφού τόσο το χαλίκι, όσο και το HDPE, φαίνεται να συνέβαλλαν σημαντικά στις διαδικασίες διήθησης, καθίζησης και κροκίδωσης κολλοειδών σωματιδίων, διαδικασίες σημαντικές στην αφαίρεση TSS (Stefanakis et al. , 2014).

Η αδυναμία απομάκρυνσης των TSS κατά τον πρώτο μήνα λειτουργίας των συστημάτων, αιτιολογείται από το χρόνο προσαρμογής των συστημάτων, τα οποία βρίσκονταν στην αρχική τους φάση (start-up). Με το πέρας του πρώτου μήνα, οι απομακρύνσεις αυξήθηκαν ραγδαία, γεγονός που αποδεικνύει την πραγματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών για την μείωση των TSS.

Με την αύξηση της φόρτισης και του χρόνου ανάπαυσης κατά τον μήνα Σεπτέμβριο, φαίνεται ότι τα συστήματα επηρεάστηκαν αρκετά και χρειάστηκαν λίγο χρόνο στην προσαρμογή των νέων συνθηκών, κάτι που πραγματοποιήθηκε τους τελευταίους μήνες με την σταθεροποίηση των απομακρύνσεων. Σύμφωνα με (Stefanakis et al. , 2014), η περιοδική φόρτιση και ο χρόνος ανάπαυσης των συστημάτων, συμβάλλουν στην ενίσχυση του αερισμού της κλίνης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την οξείδωση συσσωρευμένων οργανικών στερεών.

**Διάγραμμα 4.18** Συγκέντρωση TSS εισροών και εκροών των μονάδων G,P και C.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη παρούσα διπλωματική εργασία, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα, σχετικά με τη λειτουργία και τη περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των συστημάτων κάθετης υποεπιφανειακής ροής τεχνητών υδροβιότοπων:

- Με τη παρουσία βλάστησης, και συγκεκριμένα του φυτού *Phragmites Australis*, τα συστήματα εμφάνιζαν υψηλή μέση εξατμισοδιαπνοή κατά τη πραγματοποίηση του πειράματος. Οι απώλειες λόγω διαπνοής του φυτού εμφανίστηκαν να είναι αρκετά υψηλές ακόμα και τους πιο χειμωνιάτικους μήνες.
- Η παρουσία βλάστησης, αποτέλεσε επίσης σημαντικό παράγοντα στην απομάκρυνση της πλειονότητας των ρύπων. Η παραγωγή οργανικής ύλης από τα φυτά, κατά τη φωτοσύνθεση, η οποία δρα ως πηγή ενέργειας για την ετερότροφη δραστηριότητα μικροοργανισμών, είναι η βάση μετασχηματισμού και αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Παράλληλα, με την ανάπτυξη της ριζόσφαιρας των μακροφύτων στον υδροβιότοπο, αναπτύσσονται αυξημένοι πληθυσμοί διαφόρων μικροοργανισμών, αυξάνεται το πορώδες στο σύστημα και ενισχύονται μηχανισμοί όπως διήθηση, καθίζηση, κύριοι παράγοντες για την αποτελεσματικότερη επεξεργασία αστικών λυμάτων.

- iii. Το σύστημα χωρίς την βλάστηση, εμφάνισε μεγάλη αδυναμία στην απομάκρυνση επίμονων και πολύπλοκων ρύπων όπως του αζώτου (TN και  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) και του φωσφόρου ( $\text{TN}$  και  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ).
- iv. Η χρήση ειδικού ανακυκλωμένου πλαστικού HDPE, δυο διαφορετικών μεγεθών, ως υλικό υποστρώματος στα συστήματα VF CWs, αποτελεί μια αξιόπιστη και ωφέλιμη επιλογή. Λόγω των πλεονεκτημάτων του όσο αναφορά το υψηλό πορώδες του, την ευκολία στο χειρισμό του και την ικανότητα ελαχιστοποίησης της απόφραξης που προσφέρει, ενισχύει αποτελεσματικά την απομάκρυνση ρύπων σε ένα VF CW.
- v. Το ανακυκλωμένο πλαστικό HDPE, ως μια καινοτόμα εναλλακτική πληρωτικού μέσου, παρέχει ικανοποιητικά και τις περισσότερες φορές καλύτερα αποτελέσματα από το χαλίκι, υλικό ευρέως χρησιμοποιούμενο ως υπόστρωμα στους CW.
- vi. Η θερμοκρασία και η αλλαγή της περιόδου και της ποσότητας τροφοδοσίας, είναι παράγοντες που επηρεάζουν ρύπους αζώτου (TN και  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) και ρύπους φωσφόρου (TP και  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ). Με την σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας, αλλά και την σταδιακή αύξηση της τροφοδοσίας των συστημάτων, με την παράλληλη αύξηση της περιόδου ανάπαυσης των συστημάτων μεταξύ των ποτισμάτων, οι απομακρύνσεις των παραπάνω ρύπων μειώθηκαν, με σημαντική αναφορά την αδυναμία απομάκρυνσης  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  στα συστήματα.
- vii. Η απομάκρυνση  $\text{BOD}_5$  και COD επηρεάζεται κυρίως από την ανάπτυξη και δράση αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών στο σύστημα, ενώ τόσο η θερμοκρασία, όσο και ο τρόπος και η ποσότητα τροφοδοσίας, φαίνεται να έχουν δευτερεύον ρόλο.
- viii. Για την απομάκρυνση TOC, η ύπαρξη βλάστησης και συγκεκριμένα ρίζες *Phragmites Australis*, παρουσιάζεται ως εμπόδιο στα συστήματα.
- ix. Στις μονάδες VF CWs που κατασκευάστηκαν, φαίνεται να επικρατούσαν αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες, κάτι που συνέφερε στην παράλληλη νιτροποίηση και απονιτροποίηση που συνέβαινε στο σύστημα, γεγονός που απέτρεψε την εμφάνιση συγκεντρώσεων  $\text{NO}_3\text{-N}$ .
- x. Τέλος, η μονάδα P η οποία αποτελούταν από δύο υποστρώματα HDPE διαφορετικών διαμέτρων και ρίζες *Phragmites Australis*, φάνηκε να ήταν η πιο αποδοτική στην απομάκρυνση της πλειονότητας των ρύπων, σε σύγκριση με τις μονάδες G και C.

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, οι προτάσεις για περαιτέρω βελτιστοποίηση και μελέτη των VF CWs είναι η εξής:

- i. Χρήση συνδυασμού διαφορετικών ειδών φυτικής βλάστησης σε ένα σύστημα όπως *Cyperus Papyrus*, *Canna Indica* L. κ.α., τα οποία έχουν ερευνηθεί σε παρόμοιους τεχνητούς υδροβιότοπους και φαίνεται να προσφέρουν καλύτερες απομάκρυνσης ρύπων, τους οποίους το *Phragmites Australis* εμφάνισε αδυναμία επεξεργασίας.
- ii. Συνδυασμό διαφορετικών υποστρωμάτων HDPE, διαφορετικών διαμέτρων, και χαλικιού.
- iii. Δημιουργία υβριδικών συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων, πολλαπλών δηλαδή υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής (κάθετης και οριζόντιας), για την βέλτιστη αντιμετώπιση ρύπων.
- iv. Χρήση αερισμού στους πυθμένες των μονάδων επεξεργασίας, για την αύξηση του οξυγόνου στα συστήματα. Η λειτουργία αυτή θα συμβάλει σε περαιτέρω ανάπτυξη

- μικροοργανισμών στην απομάκρυνση οργανικής ύλης, ενώ παράλληλα θα ενίσχυε διαδικασίες όπως είναι η νιτροποίηση.
- v. Απομάκρυνση της ξηρής βιομάζας, ώστε να αποφευχθεί η επανακυκλοφορία φωσφόρου και αζώτου στο σύστημα, αλλά και περιοδικό κλάδεμα των φυτών για την αποφυγή κορεσμού του και την ενίσχυση της απομάκρυνσης.
  - vi. Η χρήση HDPE ως υλικό υποστρώματος, ενισχύει την αειφορία του συστήματος, κρίνεται όμως αναγκαία η ανάπτυξη των ερευνών για την διαβεβαίωση της μη μόλυνσης των υδάτων από μικροπλαστικά. Παράλληλα, προτείνεται η έρευνα ανάπτυξης διαφορετικών ανακυκλώσιμων υλικών για τη χρήση τους ως υλικό υποστρώματος σε έναν CW.
  - vii. Προσθήκη βιοεξανθρακώματος στις μονάδες τεχνητών υγροβιότοπων. Η χρήση τους σε CWs έχει ερευνηθεί ότι αυξάνει την απόδοση απομάκρυνση ρύπων, αυξάνοντας την βιομάζα εντός του συστήματος και ενισχύοντας στην ανάπτυξη μικροβιακού βιοφίλμ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγελάκης ΑΝ., Τσομπάνογλου Γ. (1995). Υγρά απόβλητα. Φυσικά συστήματα επεξεργασίας και ανάκτησης, επαναχρησιμοποίησης και διάθεσης εκροών. Ηράκλειο, Ελλάδα, 2, 157-199

Κουϊμτζής Θ. (1994). Χημεία Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παρανυχιανάκης Ν., Σημειώσεις Μαθήματος " Αποκεντρωμένα Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων", Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2021.

Προχάσκα, Χ. (2005). *Μελέτη της επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση φυσικών συστημάτων* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Σιούτη Π. Γλυκερία (2018). 'Εγχειρίδιο Δικαίου Περιβάλλοντος', Γ έκδοση, Εκδόσεις Σάκκουλα.

Τσιχριντζής, Β. Α. (2000). Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία. Τόμος II, Εκδ.Δ ημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Τσόγκας Χ. (1998). Δίκτυα αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων, εκδόσεις ΙΩΝ, Θεσσαλονίκη.

### ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abou-Elala, S. I., Elekhawy, M. A., Khalil, M. T., & Hellal, M. S. (2017). Factors affecting the performance of horizontal flow constructed treatment wetland vegetated with *Cyperus papyrus* for municipal wastewater treatment. *International journal of phytoremediation*, 19(11), 1023-1028.

Akpor, O. B., Adelani-Akande, T. A., & Aderiye, B. I. (2013). The effect of temperature on nutrient removal from wastewater by selected fungal species. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2(9), 328-340.

- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191.
- Alexandros, S. I., & Akratos, C. S. (2016). Removal of pathogenic bacteria in constructed wetlands: mechanisms and efficiency. In *Phytoremediation* (pp. 327-346). Springer, Cham.
- Almuktar, S. A., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23595-23623.
- Alufasi, R., Gere, J., Chakauya, E., Lebea, P., Parawira, W., & Chingwaru, W. (2017). Mechanisms of pathogen removal by macrophytes in constructed wetlands. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 135-144.
- Amos, P. W., & Younger, P. L. (2003). Substrate characterisation for a subsurface reactive barrier to treat colliery spoil leachate. *Water Research*, 37(1), 108-120.
- Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Quesada-Medina, J., & Almela, L. (2017). Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland: A case study in the southeast of Spain. *Bioresource Technology*, 233, 236-246.
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725.
- Baptista, J. D. C., Donnelly, T., Rayne, D., & Davenport, R. J. (2003). Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. *Water Science and Technology*, 48(5), 127-134.
- Cao, Z., Zhou, L., Gao, Z., Huang, Z., Jiao, X., Zhang, Z., ... & Bai, Y. (2021). Comprehensive benefits assessment of using recycled concrete aggregates as the substrate in constructed wetland polishing effluent from wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125551.
- Carrasco-Acosta, M., Garcia-Jimenez, P., Herrera-Melián, J. A., Peñate-Castellano, N., & Rivero-Rosales, A. (2019). The effects of plants on pollutant removal, clogging, and bacterial community structure in palm mulch-based vertical flow constructed wetlands. *Sustainability*, 11(3), 632.
- Chen, D., Gu, X., Zhu, W., He, S., Huang, J., & Zhou, W. (2019). Electrons transfer determined greenhouse gas emissions in enhanced nitrogen-removal constructed wetlands with different carbon sources and carbon-to-nitrogen ratios. *Bioresource technology*, 285, 121313.
- Choudhary, A. K., Kumar, S., & Sharma, C. (2011). Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollut*, 37(8), 3666-3672.
- Dabees, S., Tirth, V., Mohamed, A., & Kamel, B. M. (2021). Wear performance and mechanical properties of MWCNT/HDPE nanocomposites for gearing applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 2476-2488.
- Dotro, G., Fort, R. P., Barak, J., Jones, M., Vale, P., & Jefferson, B. (2015). Long-term performance of constructed wetlands with chemical dosing for phosphorus removal. In *The role of natural and constructed wetlands in nutrient cycling and retention on the landscape* (pp. 273-292). Springer, Cham.
- Du, L., Trinh, X., Chen, Q., Wang, C., Wang, H., Xia, X., ... & Wu, Z. (2018). Enhancement of microbial nitrogen removal pathway by vegetation in Integrated Vertical-Flow Constructed Wetlands (IVCWs) for treating reclaimed water. *Bioresource technology*, 249, 644-651.

- Du, M., Xu, D., Trinh, X., Liu, S., Wang, M., Zhang, Y., ... & Wu, Z. (2016). EPS solubilization treatment by applying the biosurfactant rhamnolipid to reduce clogging in constructed wetlands. *Bioresource technology*, 218, 833-841.
- Fan, J., Zhang, B., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, F., ... & Wu, H. (2013). Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource technology*, 141, 117-122.
- Gall, A. M., Mariñas, B. J., Lu, Y., & Shisler, J. L. (2015). Waterborne viruses: a barrier to safe drinking water. *PLoS pathogens*, 11(6), e1004867.
- García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinin-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., del Pino, L. F., & Avilés-Añazco, A. (2019). Performance of Phragmites Australis and Cyperus Papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 286-296.
- Garcia, J., Rousseau, D. P., Morato, J., Lesage, E. L. S., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010). Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 40(7), 561-661.
- Gupta, S. K., Shriwastav, A., Kumari, S., Ansari, F. A., Malik, A., & Bux, F. (2015). Phycoremediation of emerging contaminants. In *algae and environmental sustainability* (pp. 129-146). Springer, New Delhi.
- Hamada, M. S., Ibaid, Z. Z., & Shatat, M. (2021). Performance of citrus charcoal and olivepomace charcoal as natural substrates in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100801.
- Hench, K. R., Bissonnette, G. K., Sextstone, A. J., Coleman, J. G., Garbutt, K., & Skousen, J. G. (2003). Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. *Water research*, 37(4), 921-927.
- Hu, Y., Zhao, Y., Zhao, X., & Kumar, J. L. (2012). High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland. *Environmental science & technology*, 46(8), 4583-4590.
- Huang, M., Wang, Z., & Qi, R. (2017). Enhancement of the complete autotrophic nitrogen removal over nitrite process in a modified single-stage subsurface vertical flow constructed wetland: Effect of saturated zone depth. *Bioresource technology*, 233, 191-199.
- Ji, M., Hu, Z., Hou, C., Liu, H., Ngo, H. H., Guo, W., ... & Zhang, J. (2020). New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures. *Bioresource technology*, 301, 122722.
- Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D., (2009). *Treatment Wetlands*, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kotti, I. P., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering*, 36(7), 862-875.
- Kurzbaum, E., Zimmels, Y., Kirzhner, F., & Armon, R. (2010). Removal of phenol in a constructed wetland system and the relative contribution of plant roots, microbial activity and porous bed. *Water Science and Technology*, 62(6), 1327-1334.
- Langergraber, G., & Dotro, G. (2019). *Wetland technology: practical information on the design and application of treatment wetlands*. IWA publishing.



- Li, F., Lu, L., Zheng, X., Ngo, H. H., Liang, S., Guo, W., & Zhang, X. (2014). Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-feeding. *Bioresource technology*, 169, 395-402.
- Li, M., Zhou, Q., Tao, M., Wang, Y., Jiang, L., & Wu, Z. (2010). Comparative study of microbial community structure in different filter media of constructed wetland. *Journal of Environmental Sciences*, 22(1), 127-133.
- Liu, F. F., Fan, J., Du, J., Shi, X., Zhang, J., & Shen, Y. (2019). Intensified nitrogen transformation in intermittently aerated constructed wetlands: Removal pathways and microbial response mechanism. *Science of the Total Environment*, 650, 2880-2887.
- Luis, A., Lorena, E. G. A., Amaya, L., & Iñaki, T. (2021). Unplanted wetland-type filter for co-treatment of landfill leachate and septic tank wastewater: Analysing gravel replacement by plastic and passive (filling-emptied) aeration effects at pilot scale. *Journal of Environmental Management*, 294, 112940.
- Makisha, N. (2016). Waste water and biogas—ecology and economy. *procedia engineering*, 165, 1092-1097.
- Mara, D. D. (1997). Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India, Lagoon. *Technology International Ltd. Leeds*.
- Mara, D. D. (2006). Natural wastewater treatment. *CIWEM, England*.
- Mara, D. D., Mills, S. W., Pearson, H. W., & Alabaster, G. P. (1992). Waste stabilization ponds: a viable alternative for small community treatment systems. *Water and Environment Journal*, 6(1), 72-78.
- Martins, S., Barros, M. M., da Costa Pereira, P. S., & Bastos, D. C. (2019). Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalyzers as flame retardant in recycled high density polyethylene. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2386-2394.
- Maucieri, C., Salvato, M., & Borin, M. (2020). Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 152, 105853.
- Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1999). Tertiary lagoons: a review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(1), 1-13.
- Mehtab, K., ur Rehman, A., Ishfaq, S., & Jamil, R. A. (2017). Virtual leadership: A review paper. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 8(4 S1), 183.
- Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Midhun, G., Divya, L., George, J., Jayakumar, P., & Suriyanarayanan, S. (2016). Wastewater treatment studies on free water surface constructed wetland system. In *Integrated Waste Management in India* (pp. 97-109). Springer, Cham.
- Morari, F., & Giardini, L. (2009). Municipal wastewater treatment with vertical flow constructed wetlands for irrigation reuse. *Ecological Engineering*, 35(5), 643-653.
- Mu, X., Zhang, S., Han, B., Hua, Z., Fu, D., & Li, P. (2020). Impacts of water flow on epiphytic microbes and nutrients removal in constructed wetlands dominated by *Vallisneria spiralis* with decreasing temperature. *Bioresource Technology*, 318, 124058.
- Mudulia, M., & Ray, S. (2021) Constructed wetlands for municipal wastewater treatment: a sustainable approach.

- Nivala, J., Abdallat, G., Aubron, T., Al-Zreiqat, I., Abbassi, B., Wu, G. M., ... & Müller, R. A. (2019). Vertical flow constructed wetlands for decentralized wastewater treatment in Jordan: Optimization of total nitrogen removal. *Science of the total environment*, 671, 495-504.
- Paing, J., Guilbert, A., Gagnon, V., & Chazarenc, F. (2015). Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: a survey based on 169 full scale systems. *Ecological engineering*, 80, 46-52.
- Pan, J., Fei, H., Song, S., Yuan, F., & Yu, L. (2015). Effects of intermittent aeration on pollutants removal in subsurface wastewater infiltration system. *Bioresource Technology*, 191, 327-331.
- Pan, J., Zhang, H., Li, W., & Ke, F. (2012). Full-scale experiment on domestic wastewater treatment by combining artificial aeration vertical-and horizontal-flow constructed wetlands system. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(9), 5673-5683.
- Papadopoulos, A., Parisopoulos, G., Papadopoulos, F., & Karteris, A. (2003). Sludge accumulation pattern in an anaerobic pond under Mediterranean climatic conditions. *Water Research*, 37(3), 634-644.
- Paxton, N. C., Allenby, M. C., Lewis, P. M., & Woodruff, M. A. (2019). Biomedical applications of polyethylene. *European Polymer Journal*, 118, 412-428.
- Priya, S. G., & Brighu, U. (2013). Comparison of different types of media for nutrient removal efficiency in vertical upflow constructed wetlands. *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 4(5).
- Rahi, M. A., Faisal, A. A., Naji, L. A., Almuktar, S. A., Abed, S. N., & Scholz, M. (2020). Biochemical performance modelling of non-vegetated and vegetated vertical subsurface-flow constructed wetlands treating municipal wastewater in hot and dry climate. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101003.
- Rasheed, A. M., Mansoor, M. M. A., Ahmath, M. H. A., & Shameer, S. M. (2014). Nutrient Removal in Hybrid Constructed Wetlands. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 5, 1004-1006.
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448.
- Sadik, W. A., El-Demerdash, A. G. M., Abokhateeb, A. E., & Elessawy, N. A. (2021). Innovative high-density polyethylene/waste glass powder composite with remarkable mechanical, thermal and recyclable properties for technical applications. *Heliyon*, 7(4), e06627.
- Saharimoghaddam, N., Massoudinejad, M., & Ghaderpoori, M. (2019). Removal of pollutants (COD, TSS, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) from textile effluent using *Gambusia* fish and *Phragmites australis* in constructed wetlands. *Environmental geochemistry and health*, 41(3), 1433-1444.
- Santos, D., Silva, W., Gomes, A., Simões, R., Pascoa, R., Albuquerque, A., & Stefanakis, A. (2012, January). Treatment of cork processing industrial effluent with an innovative system of Constructed Wetland and Ozonation. In *Proceedings of the Symposium on Sustainable Processes and Materials*. University of Beira Interior.
- Savini, G., & Orefice, R. L. (2020). Comparative study of HDPE composites reinforced with microtalc and nanotals: high performance filler for improving ductility at low concentration levels. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 16387-16398.
- Schwab, K. (2007). Waterborne gastroenteritis viruses. *Perspectives in medical virology*, 17, 27-38.

- Shilton, A., & Harrison, J. (2003). Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilisation ponds. *Water Science and Technology*, 48(2), 173-180.
- Shingare, R. P., Thawale, P. R., Raghunathan, K., Mishra, A., & Kumar, S. (2019). Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. *Journal of environmental management*, 246, 444-461.
- Shukla, R., Gupta, D., Singh, G., & Mishra, V. K. (2021). Performance of horizontal flow constructed wetland for secondary treatment of domestic wastewater in a remote tribal area of Central India. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 1-10.
- Skoulidakis, N. T. (2009). The environmental state of rivers in the Balkans—A review within the DPSIR framework. *Science of the total environment*, 407(8), 2501-2516.
- Smith, R.D. and Schroeder, E.D. (1985). Field studies of the overland flow process for the treatment of raw and primary treated municipal wastewater. *J. of MPCF*. 57(5): 785-794.
- Stefanakis, A. I., Akratos, C. S., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2009). Effluent quality improvement of two pilot-scale, horizontal subsurface flow constructed wetlands using natural zeolite (clinoptilolite). *Microporous and Mesoporous Materials*, 124(1-3), 131-143.
- Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. Newnes.
- Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2009). Effect of outlet water level raising and effluent recirculation on removal efficiency of pilot-scale, horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Desalination*, 248(1-3), 961-976.
- Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2011). Dewatering mechanisms in pilot-scale sludge drying reed beds: effect of design and operational parameters. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 430-443.
- Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical engineering journal*, 181, 416-430.
- Stefanakis<sup>1</sup>, A., Seeger<sup>1</sup>, E., Hübschmann<sup>1</sup>, T., Müller<sup>1</sup>, S., Sinke, A., & Thullner<sup>1</sup>, M. (2013). Investigation of phenol and m-cresol biodegradation in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *DNA*, 10, 4.
- Stefanakis, A. I. (Ed.). (2018). *Constructed wetlands for industrial wastewater treatment*.
- Stefanakis, A. I. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 6981.
- Stefanakis, A. I. (2020). Constructed wetlands: description and benefits of an eco-tech water treatment system. In *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 503-525). IGI Global.
- Stanković, D. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Građevinar*, 69(08.), 639-652.
- Sultana, M. Y., Akratos, C. S., Vayenas, D. V., & Pavlou, S. (2015). Constructed wetlands in the treatment of agro-industrial wastewater: A review. *Hemijaska industrija*, 69(2), 127-142.
- Swarnakar, V., Singh, A. R., Antony, J., Jayaraman, R., Tiwari, A. K., Rath, R., & Cudney, E. (2022). Prioritizing Indicators for Sustainability Assessment in Manufacturing Process: An Integrated Approach. *Sustainability*, 14(6), 3264.
- Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological engineering*, 7(1), 59-83.

- Tatoulis, T., Akrotos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G., Vayenas, D. V., & Stefanakis, A. I. (2017). A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere*, 186, 257-268.
- Tilley, E., Lüthi, C., Morel, A., Zurbrügg, C., & Schertenleib, R. (2008). Compendium of Sanitation Systems and Technologies Dübendorf. *Zwitzerland, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG)*.
- Toscano, A., Marzo, A., Milani, M., Cirelli, G. L., & Barbagallo, S. (2015). Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species. *Ecological Engineering*, 75, 155-160.
- Uusheimo, S., Huotari, J., Tulonen, T., Aalto, S. L., Rissanen, A. J., & Arvola, L. (2018). High nitrogen removal in a constructed wetland receiving treated wastewater in a cold climate. *Environmental science & technology*, 52(22), 13343-13350.
- Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. (2021). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*, 755, 142540.
- Venditti, S., Brunhoferova, H., & Hansen, J. (2022). Behaviour of 27 selected emerging contaminants in vertical flow constructed wetlands as post-treatment for municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 819, 153234.
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow* (Vol. 14). Springer science & business media.
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., & Mander, Ü. (2006). Constructed wetlands for wastewater treatment. In *Wetlands and natural resource management* (pp. 69-96). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological engineering*, 35(1), 1-17.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental science & technology*, 45(1), 61-69.
- Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 61P, 582–592.
- Wei, J., Cui, L., Li, W., Lei, Y., Ping, Y., Sun, B., ... & Liang, Z. (2017). Nitrogen and phosphorus removal effect in subsurface constructed wetland under low temperature condition. *Ecol. Sci*, 36, 43-47.
- Wu, H., Fan, J., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(19), 14637-14650.
- Wu, H., Zhang, J., Li, P., Zhang, J., Xie, H., & Zhang, B. (2011). Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China. *Ecological Engineering*, 37(4), 560-568.
- Wu, J., Xu, D., Zhou, Q., Zhang, L., He, F., & Wu, Z. (2019). Effects of layered combined substrates on plant growth and treatment performance and its spatiotemporal variation of vertical-flow constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 23082-23094.

Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kusch, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2015). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, 201, 107-120.

Yeh, T. Y. (2008). Removal of metals in constructed wetlands: Review. *Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management*, 12(2), 96-101.

Yu, G., Peng, H., Fu, Y., Yan, X., Du, C., & Chen, H. (2019). Enhanced nitrogen removal of low C/N wastewater in constructed wetlands with co-immobilizing solid carbon source and denitrifying bacteria. *Bioresource technology*, 280, 337-344.

Zhao, X., Guo, M., Chen, J., Zhuang, Z., Zhang, T., Wang, X., ... & Bai, S. (2022). Successional dynamics of microbial communities in response to concentration perturbation in constructed wetland system. *Bioresource Technology*, 127733.

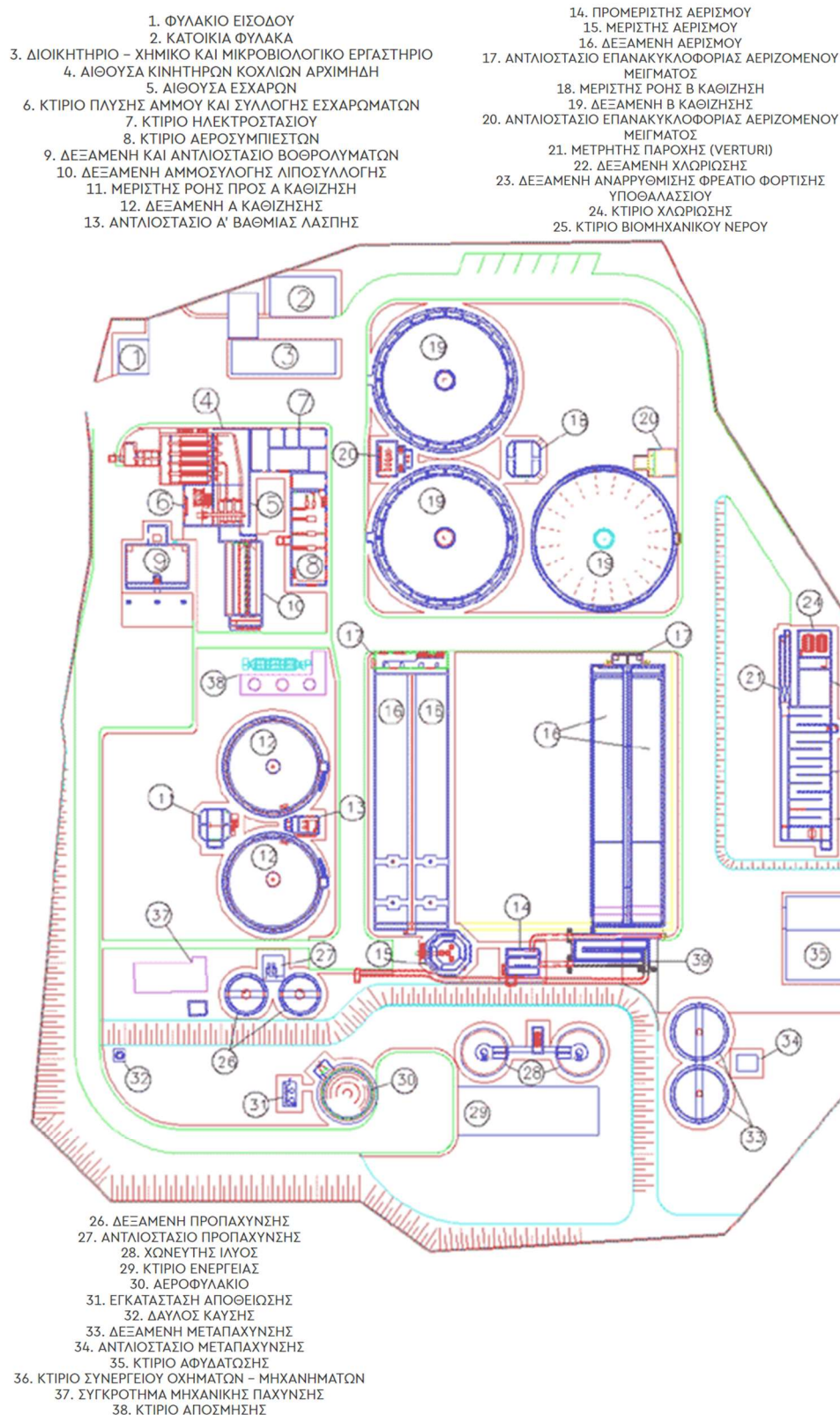
Zhao, Y. J., Liu, B., Zhang, W. G., Ouyang, Y., & An, S. Q. (2010). Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands in responding to variation in influent C/N ratios of simulated urban sewage. *Bioresource Technology*, 101(6), 1693-1700.

Zhu, T., Gao, J., Huang, Z., Shang, N., Gao, J., Zhang, J., & Cai, M. (2021). Comparison of performance of two large-scale vertical-flow constructed wetlands treating wastewater treatment plant tail-water: Contaminants removal and associated microbial community. *Journal of Environmental Management*, 278, 111564.

Zidan, A. R. A., El-Gamal, M. M., Rashed, A. A., & Eid, M. A. A. E. H. (2015). Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage). *Water Science*, 29(1), 26-35.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

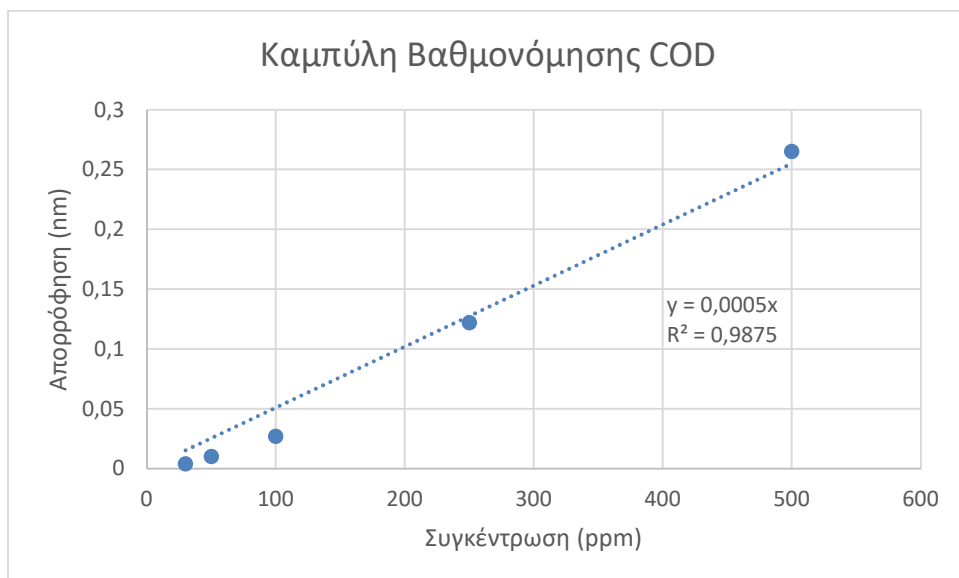
### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΟΨΗ ΕΕΛ ΧΑΝΙΩΝ



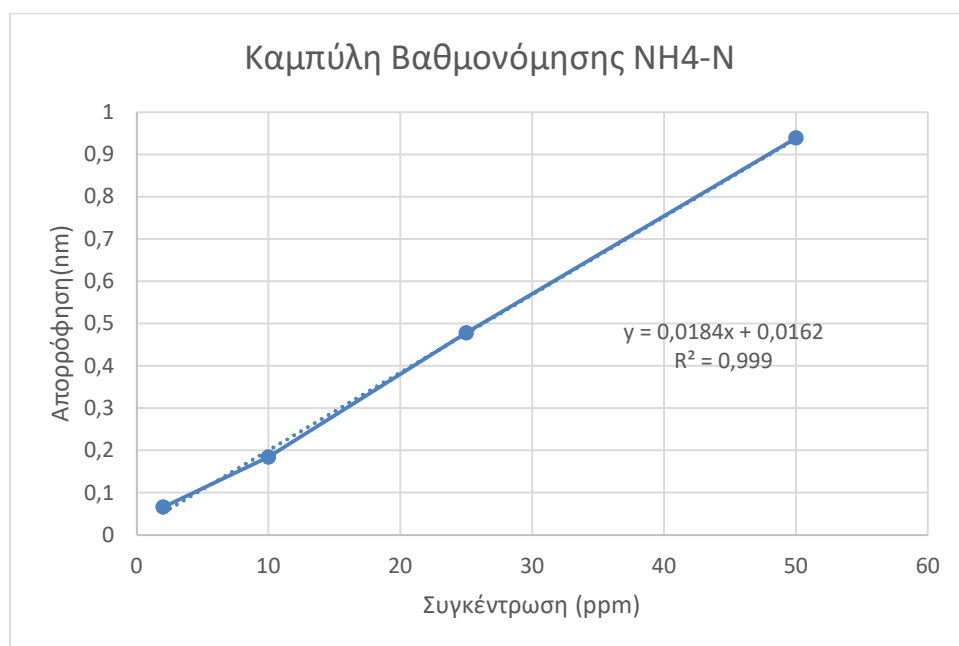
(<https://deyach.gr>)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

### 1. Καμπύλη Βαθμονόμησης Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου COD (για 30-500 mg/L)

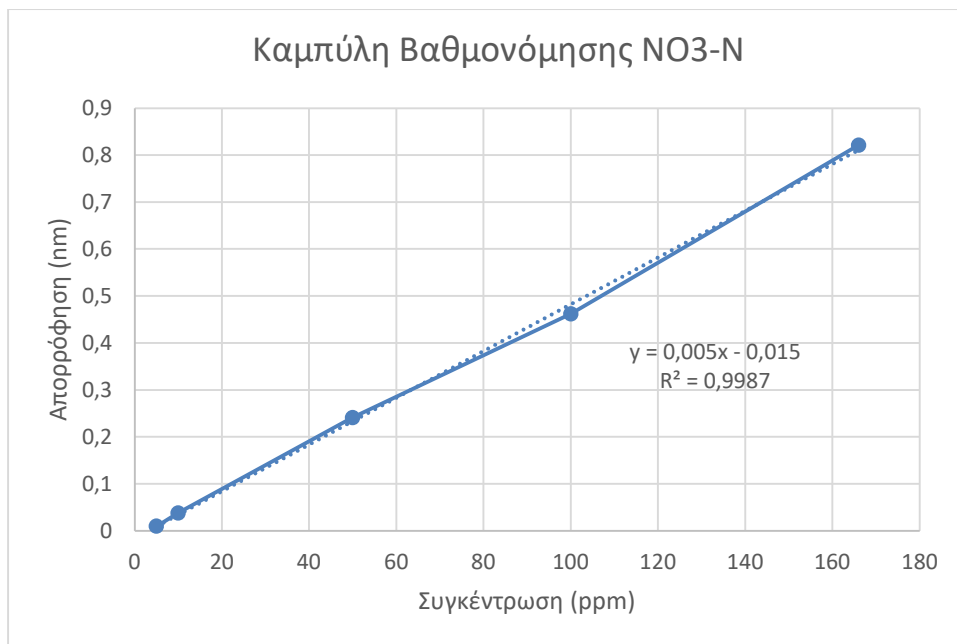


### 2. Καμπύλη Βαθμονόμησης Αμμωνιακού Αζώτου $\text{NH}_4\text{-N}$ ( για 2-50 mg/L)

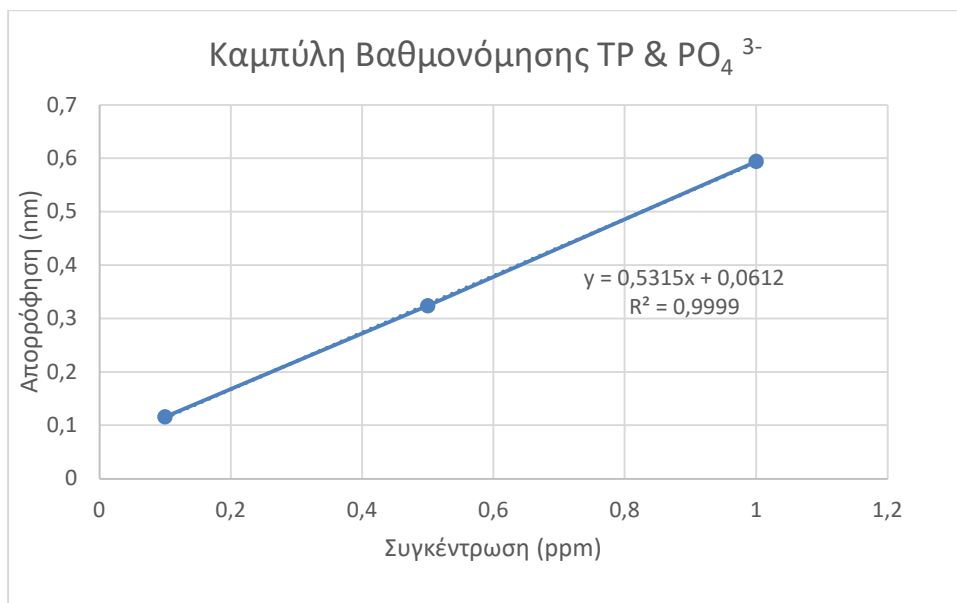


### 3. Καμπύλη Βαθμονόμησης Αζώτου σε μορφή Νιτρικών $\text{NO}_3\text{-N}$ ( για 5-166 mg/L)





4. Καμπύλη βαθμονόμησης Ολικού Φωσφόρου TP & Φωσφορικών PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (για 0,1-1 mg/L)



#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ-ΕΚΡΟΩΝ, ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΕΩΝ ΟΓΚΩΝ, HRT

Παρακάτω εμφανίζονται οι μετρήσεις εισροών και εκροών, οι απομακρύνσεις των όγκων και οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής για τις μονάδες G,P και C, για τους μήνες Ιούλιο-Δεκέμβρη.

Date	G		P		C		G ΔL	P ΔL	C ΔL	G HRT (days)	P HRT (days)	C HRT (days)
	IN(L)	OUT(L)	IN(L)	OUT(L)	IN(L)	OUT(L)						
8- Ιουλ- 21	1	0,24	1	0,1	1	0,5	0,76	0,9	0,5	50,53	50,53	58,69
9- Ιουλ- 21	1	0,07	1	0,45	1	0,44	0,93	0,55	0,56	50,53	50,53	58,69
10- Ιουλ- 21	1	0	1	0,55	1	0,64	1	0,45	0,36	50,53	50,53	58,69
11- Ιουλ- 21	1	0,01	1	0,17	1	0,5	0,99	0,83	0,5	50,53	50,53	58,69
12- Ιουλ- 21	1	0	1	0	1	0,35	1	1	0,65	50,53	50,53	58,69
13- Ιουλ- 21	1	0	1	0,03	1	0,45	1	0,97	0,55	50,53	50,53	58,69
14- Ιουλ- 21	1	0	1	0	1,5	0,61	1	1	0,89	50,53	50,53	39,13
15- Ιουλ- 21	4	0,91	5	1,5	1,5	0,96	3,09	3,5	0,54	12,63	10,11	39,13
16- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0,9	1,5	0,61	1,5	0,6	0,89	33,69	33,69	39,13
17- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0,05	1,5	0,85	1,5	1,45	0,65	33,69	33,69	39,13
18- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0,06	1,5	0,83	1,5	1,44	0,67	33,69	33,69	39,13
19- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,75	1,5	1,5	0,75	33,69	33,69	39,13
20- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	1,26	1,5	1,5	0,24	33,69	33,69	39,13
21- Ιουλ- 21	4	0,89	4	0,72	1,5	1	3,11	3,28	0,5	12,63	12,63	39,13
22- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0,1	1,5	1,03	1,5	1,4	0,47	33,69	33,69	39,13
23- Ιουλ- 21	3,5	0,91	3,5	1,1	1,5	0,9	2,59	2,4	0,6	14,44	14,44	39,13
24- Ιουλ- 21	1,5	0,08	1,5	0,01	1,5	0,98	1,42	1,49	0,52	33,69	33,69	39,13
25- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,92	1,5	1,5	0,58	33,69	33,69	39,13
26- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,89	1,5	1,5	0,61	33,69	33,69	39,13

27- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,87	1,5	1,5	0,63	33,69	33,69	39,13
28- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	1,01	1,5	1,5	0,49	33,69	33,69	39,13
29- Ιουλ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,93	1,5	1,5	0,57	33,69	33,69	39,13
30- Ιουλ- 21	1	0	1	0	1	0,42	1	1	0,58	50,53	50,53	58,69
31- Ιουλ- 21	1	0	1	0	1	0,66	1	1	0,34	50,53	50,53	58,69
1- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	1,01	1,5	1,5	0,49	33,69	33,69	39,13
2- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,92	1,5	1,5	0,58	33,69	33,69	39,13
3- Αυγ- 21	5	1,26	5	1,66	1,5	1,62	3,74	3,34	- 0,12	10,11	10,11	39,13
4- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,45	1,5	1,5	1,05	33,69	33,69	39,13
5- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,82	1,5	1,5	0,68	33,69	33,69	39,13
6- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,91	1,5	1,5	0,59	33,69	33,69	39,13
7- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,47	1,5	1,5	1,03	33,69	33,69	39,13
8- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,98	1,5	1,5	0,52	33,69	33,69	39,13
9- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,96	1,5	1,5	0,54	33,69	33,69	39,13
10- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,92	1,5	1,5	0,58	33,69	33,69	39,13
11- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,89	1,5	1,5	0,61	33,69	33,69	39,13
12- Αυγ- 21	2	1,39	2		2	1,68	0,61	2	0,32	25,27	25,27	29,35
13- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,81	1,5	1,5	0,69	33,69	33,69	39,13
14- Αυγ- 21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,95	1,5	1,5	0,55	33,69	33,69	39,13
15-	1,5	0	1,5	0	1,5	0,97	1,5	1,5	0,53	33,69	33,69	39,13

Aug-21												
16-Aug-21							1,5	1,5	0,58	33,69	33,69	39,13
17-Aug-21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,92						
							1,42	1,5	0,59	33,69	33,69	39,13
18-Aug-21	1,5	0,08	1,5	0	1,5	0,91						
							1,22	1,5	0,53	33,69	33,69	39,13
19-Aug-21	1,5	0,28	1,5	0	1,5	0,97						
							1,5	1,5	0,38	33,69	33,69	39,13
20-Aug-21	1,5	0	1,5	0	1,5	1,12						
							0,44	0,21	0,37	33,69	33,69	39,13
21-Aug-21	1,5	1,06	1,5	1,29	1,5	1,13						
							1,5	1,5	0,39	33,69	33,69	39,13
22-Aug-21	1,5	0	1,5	0	1,5	1,11						
							1,5	1,5	0,56	33,69	33,69	39,13
23-Aug-21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,94						
							1,5	1,5	0,6	33,69	33,69	39,13
24-Aug-21	1,5	0	1,5	0	1,5	0,9						
							5	5	1	10,11	10,11	11,74
27-Aug-21	5	0	5	0	5	4						
							2,55	3,59	0,9	10,11	10,11	11,74
30-Aug-21	5	2,45	5	1,41	5	4,1						
							5	5	0,15	10,11	10,11	11,74
2-Σεπ-21	5	0	5	0	5	4,85						
							3,31	5	0,45	10,11	10,11	11,74
5-Σεπ-21	5	1,69	5	0	5	4,55						
							2,78	2,41	0,41	10,11	10,11	11,74
8-Σεπ-21	5	2,22	5	2,59	5	4,59						
							4,93	4,94	0,05	10,11	10,11	11,74
11-Σεπ-21	5	0,07	5	0,06	5	4,95						
							1,55	3,08	0,2	8,42	10,11	11,74
14-Σεπ-21	6	4,45	5	1,92	5	4,8						
							2,15	1,38	0,3	10,11	10,11	11,74
17-Σεπ-21	5	2,85	5	3,62	5	4,7						
							4,63	5	0,27	10,11	10,11	11,74
20-Σεπ-21	5	0,37	5	0	5	4,73						
							2,37	3,9	0,35	10,11	10,11	11,74
23-Σεπ-21	5	2,63	5	1,1	5	4,65						
							5	5	0,54	10,11	10,11	11,74

21												
26- ΣΕΠ- 21	8	3,53	8	0,55	8	7,1	4,47	7,45	0,9	6,32	6,32	7,34
29- ΣΕΠ- 21	8	5,41	8	1,23	8	7	2,59	6,77	1	6,32	6,32	7,34
2- ΟΚΤ- 21	8	3,72	8	0,75	8	6,5	4,28	7,25	1,5	6,32	6,32	7,34
5- ΟΚΤ- 21	8	3,82	8	3,53	8	7,6	4,18	4,47	0,4	6,32	6,32	7,34
8- ΟΚΤ- 21	8	3,2	8	3,7	8	6,5	4,8	4,3	1,5	6,32	6,32	7,34
11- ΟΚΤ- 21	8	6,7	8	4,9	8	8,2	1,3	3,1	-0,2	6,32	6,32	7,34
14- ΟΚΤ- 21	8	2,78	8	4,12	8	8,1	5,22	3,88	-0,1	6,32	6,32	7,34
17- ΟΚΤ- 21	8	5,79	8	7,51	8	7,8	2,21	0,49	0,2	6,32	6,32	7,34
20- ΟΚΤ- 21	8	5,1	8	6,21	8	7,5	2,9	1,79	0,5	6,32	6,32	7,34
23- ΟΚΤ- 21	8	5,18	8	8,14	8	7,9	2,82	- 0,14	0,1	6,32	6,32	7,34
26- ΟΚΤ- 21	8	7,78	8	5,04	8	8,2	0,22	2,96	-0,2	6,32	6,32	7,34
29- ΟΚΤ- 21	8	3,92	8	4,27	8	7,9	4,08	3,73	0,1	6,32	6,32	7,34
1- ΝΟΕ- 21	8	8,13	8	6,11	8	12,2	- 0,13	1,89	-4,2	6,32	6,32	7,34
4- ΝΟΕ- 21	8	7,65	8	6,86	8	8	0,35	1,14	0	6,32	6,32	7,34
7- ΝΟΕ- 21	8	5,35	8	5,34	8	7,9	2,65	2,66	0,1	6,32	6,32	7,34
10- ΝΟΕ- 21	8	5,6	8	3,72	8	8,6	2,4	4,28	-0,6	6,32	6,32	7,34
13- ΝΟΕ- 21	8	5,68	8	8,06	8	8,7	2,32	- 0,06	-0,7	6,32	6,32	7,34
16- ΝΟΕ- 21	8	4,32	8	6,1	8	8,1	3,68	1,9	-0,1	6,32	6,32	7,34
19- ΝΟΕ- 21	8	6,46	8	6,09	8	8,2	1,54	1,91	-0,2	6,32	6,32	7,34

22- Νοε- 21	8	7,03	8	7,5	8	7,5	0,97	0,5	0,5	6,32	6,32	7,34
25- Νοε- 21	8	5,75	8	4,69	8	7,5	2,25	3,31	0,5	6,32	6,32	7,34
28- Νοε- 21	8	5,63	8	4,73	8	7,7	2,37	3,27	0,3	6,32	6,32	7,34
1- Δεκ- 21	8	5	8	3,3	8	7,55	3	4,7	0,45	6,32	6,32	7,34
4- Δεκ- 21	8	3,72	8	4,13	8	8,1	4,28	3,87	-0,1	6,32	6,32	7,34
7- Δεκ- 21	8	7,46	8	6,35	8	10,6	0,54	1,65	-2,6	6,32	6,32	7,34
10- Δεκ- 21	8	6,84	8	7,95	8	8	1,16	0,05	0	6,32	6,32	7,34

#### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ

Παρακάτω εμφανίζονται οι πειραματικές μετρήσεις εισροών (IN) και εκροών για κάθε μονάδα G, P και C, για κάθε παράμετρο, καθώς και η ποσοστιαία απομάκρυνση τους σε κάθε μονάδα από τις ανάλογες εισροές.

Date	BOD5						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	360	42	31	55	88,33	91,39	84,72
23/7	260	60	50	82	76,92	80,77	68,46
3/8	260	130	28	74	50,00	89,23	71,54
12/8	250	20	10	60	92,00	96,00	76,00
20/8	290	32	14	45	88,97	95,17	84,48
27/8	290	42	2	80	85,52	99,31	72,41
5/9	360	18	7	55	95,00	98,06	84,72
14/9	360	36	14	110	90,00	96,11	69,44
20/9	360	36	23	26	90,00	93,61	92,78
29/9	380	165	85	155	56,58	77,63	59,21
8/10	380	70	60	90	81,58	84,21	76,32
14/10	270	25	42	60	90,74	84,44	77,78
20/10	270	30	22	120	88,89	91,85	55,56
26/10	370	60	75	105	83,78	79,73	71,62
4/11	370	75	85	135	79,73	77,03	63,51
10/11	270	90	100	145	66,67	62,96	46,30

19/11	270	105	110	185	61,11	59,26	31,48
25/11	270	100	115	195	62,96	57,41	27,78
1/12	300	64	115	155	78,67	61,67	48,33
10/12	300	100	98	185	66,67	67,33	38,33
average	312,00	65,00	54,30	105,85	78,71	82,16	65,04
sd	48,41	39,71	40,02	51,23	13,36	13,90	18,48
min	250,00	18,00	2,00	26,00	50,00	57,41	27,78
max	380,00	165,00	115,00	195,00	95,00	99,31	92,78

Date	COD						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	376	50	50	60	86,70	86,70	84,04
23/7	382	170	123	115	55,50	67,80	69,90
3/8	382	150	65	80	60,73	82,98	79,06
12/8	462	78	56	80	83,12	87,88	82,68
20/8	474	78	50	98	83,54	89,45	79,32
27/8	474	50	26	120	89,45	94,51	74,68
5/9	502	45	31	67	91,04	93,82	86,65
14/9	502	102	50	108	79,68	90,04	78,49
20/9	502	68	120	70	86,45	76,10	86,06
29/9	388	282	112	194	27,32	71,13	50,00
8/10	388	126	82	206	67,53	78,87	46,91
14/10	382	58	90	66	84,82	76,44	82,72
20/10	382	84	82	130	78,01	78,53	65,97
26/10	720	124	190	126	82,78	73,61	82,50
4/11	720	90	76	152	87,50	89,44	78,89
10/11	372	92	86	112	75,27	76,88	69,89
19/11	372	64	62	94	82,80	83,33	74,73
25/11	372	50	68	106	86,56	81,72	71,51
1/12	370	62	66	72	83,24	82,16	80,54
10/12	370	56	60	64	84,86	83,78	82,70
average	444,60	93,95	77,25	106,00	77,84	82,26	75,36
sd	106,95	56,39	37,32	41,15	15,09	7,39	10,82
min	370,00	45,00	26,00	60,00	27,32	67,80	46,91
max	720,00	282,00	190,00	206,00	91,04	94,51	86,65



Date	TOC						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	48,7	13,4	10,3	7,3	72,48	78,85	85,01
23/7	-	-	-	-	-	-	-
3/8	48,7	34	32,6	11,7	30,18	33,06	75,98
12/8	48,7	26,1	20,3	13,6	46,41	58,32	72,07
20/8	66,4	32,8	23,5	13,1	50,60	64,61	80,27
27/8	66,4	23,7	24,9	16,2	64,31	62,50	75,60
5/9	59,1	25,6	25,1	13,6	56,68	57,53	76,99
14/9	59,1	22,9	26,5	9,2	61,25	55,16	84,43
20/9	59,1	30,4	29,9	14,3	48,56	49,41	75,80
29/9	31,2	22,5	21,3	12,8	27,88	31,73	58,97
8/10	31,2	22	17,4	13,1	29,49	44,23	58,01
14/10	35,2	26,4	32,9	20,6	25,00	6,53	41,48
20/10	35,2	21,3	22	13,8	39,49	37,50	60,80
26/10	30,5	26,4	29,3	19,5	13,44	3,93	36,07
4/11	30,5	22,8	20,2	15,6	25,25	33,77	48,85
10/11	25,3	20,6	20,1	14,6	18,58	20,55	42,29
19/11	25,3	18,6	18,5	13,9	26,48	26,88	45,06
25/11	25,3	24,3	15,1	15,8	3,95	40,32	37,55
1/12	43,3	17,9	15,7	14,2	58,66	63,74	67,21
10/12	43,3	17,5	15,5	14,2	59,58	64,20	67,21
average	42,8	23,6	22,2	14,1	39,91	43,83	62,61
sd	14,2	5,2	6,2	3,0	19,40	20,55	16,46
min	25,3	13,4	10,3	7,3	3,95	3,93	36,07
max	66,4	34,0	32,9	20,6	72,48	78,85	85,01

Date	TN						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	71	22	16	19	69,01	77,46	73,24
23/7	71	20,4	14,4	26,5	71,27	79,72	62,68
3/8	71	35	20	28	50,70	71,83	60,56
12/8	56	34,3	10	21	38,75	82,14	62,50
20/8	60	18,6	17,6	16	69,00	70,67	73,33
27/8	60	8,3	3,1	33	86,17	94,83	45,00
5/9	78	6,4	2,8	31	91,79	96,41	60,26

14/9	78	7,2	3,4	38	90,77	95,64	51,28
20/9	78	18,7	4,8	39	76,03	93,85	50,00
29/9	70	58	33	49	17,14	52,86	30,00
8/10	70	10	11	57	85,71	84,29	18,57
14/10	67	11	12	48	83,58	82,09	28,36
20/10	67	13	7	40	80,60	89,55	40,30
26/10	68	12	13	46	82,35	80,88	32,35
4/11	68	20	18	49	70,59	73,53	27,94
10/11	61	18	19	55	70,49	68,85	9,84
19/11	61	29	33	77	52,46	45,90	-26,23
25/11	61	25	34	66	59,02	44,26	-8,20
1/12	77	25	32	63	67,53	58,44	18,18
10/12	77	24	35	56	68,83	54,55	27,27
average	68,5	20,8	17,0	42,9	69,09	74,89	36,86
sd	6,9	12,1	11,1	16,7	18,45	16,44	26,44
min	56,0	6,4	2,8	16,0	17,14	44,26	-26,23
max	78,0	58,0	35,0	77,0	91,79	96,41	73,33

Date	NH4-N						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	46,7	21,9	14,7	14,1	53,10	68,52	69,81
23/7	42,7	13,2	8,7	15,1	69,09	79,63	64,64
3/8	42,7	15,5	14	16,1	63,70	67,21	62,30
12/8	39,8	9,5	2	11,9	76,13	94,97	70,10
20/8	28,5	8	5	11,5	71,93	82,46	59,65
27/8	28,5	2,7	0,5	8,5	90,53	98,25	70,18
5/9	30,3	0	0,3	17	100,00	99,01	43,89
14/9	30,3	1,5	0,3	24,4	95,05	99,01	19,47
20/9	30,3	14	0,3	24,6	53,80	99,01	18,81
29/9	55,1	22,3	13,5	31	59,53	75,50	43,74
8/10	55,1	10,7	4,7	33,4	80,58	91,47	39,38
14/10	41,6	31	20,5	40,6	25,48	50,72	2,40
20/10	41,6	5,8	2,8	22,1	86,06	93,27	46,88
26/10	44,8	6,9	9,3	45,1	84,60	79,24	-0,67
4/11	44,8	18,1	16,9	44,4	59,60	62,28	0,89
10/11	46,3	12,1	17	31,6	73,87	63,28	31,75
19/11	46,3	15,9	21	40,6	65,66	54,64	12,31
25/11	46,3	13,3	18,4	48,8	71,27	60,26	-5,40

1/12	45	19,5	20,8	33,2	56,67	53,78	26,22
10/12	45	34,5	20,3	40,3	23,33	54,89	10,44
average	41,6	13,8	10,6	27,7	68,00	76,37	34,34
sd	8,1	9,1	8,0	12,8	20,09	17,49	26,22
min	28,5	0,0	0,3	8,5	23,33	50,72	-5,40
max	55,1	34,5	21,0	48,8	100,00	99,01	70,18

Date	NO3-N						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	<5	<5	<5	<5			
23/7	<5	<5	<5	<5			
3/8	<5	<5	<5	<5			
12/8	<5	<5	<5	<5			
20/8	<5	<5	<5	<5			
27/8	<5	<5	<5	<5			
5/9	<5	<5	<5	<5			
14/9	<5	<5	<5	<5			
20/9	<5	<5	<5	<5			
29/9	<5	<5	<5	<5			
8/10	<5	<5	<5	<5			
14/10	<5	<5	<5	<5			
20/10	<5	<5	<5	<5			
26/10	<5	5,8	<5	<5			
4/11	<5	<5	<5	<5			
10/11	<5	<5	<5	<5			
19/11	<5	<5	<5	<5			
25/11	<5	<5	<5	<5			
1/12	<5	<5	<5	<5			
10/12	<5	<5	<5	<5			

Date	TP						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	4,846	1,381	1,307	1,593	71,50	73,03	67,13
23/7	3,991	1,523	1,404	1,479	61,84	64,82	62,94
3/8	3,991	1,492	1,531	1,667	62,62	61,64	58,23

12/8	3,335	1,640	1,504	1,807	50,82	54,90	45,82
20/8	3,918	1,733	1,620	1,947	55,77	58,65	50,31
27/8	3,918	1,521	1,449	2,272	61,18	63,02	42,01
5/9	5,181	1,813	1,475	2,011	65,01	71,53	61,19
14/9	5,181	2,979	2,446	2,948	42,50	52,79	43,10
20/9	5,181	2,327	2,355	3,010	55,09	54,55	41,90
29/9	3,939	3,095	2,782	3,452	21,43	29,37	12,36
8/10	3,939	2,291	2,628	4,149	41,84	33,28	-5,33
14/10	3,247	2,446	2,948	3,954	24,67	9,21	-21,77
20/10	3,247	2,308	2,406	3,930	28,92	25,90	-21,03
26/10	3,999	2,525	3,354	3,813	36,86	16,13	4,65
4/11	3,999	2,357	2,564	3,460	41,06	35,88	13,48
10/11	4,477	2,325	2,494	2,656	48,07	44,29	40,67
19/11	4,477	2,178	2,715	2,572	51,35	39,36	42,55
25/11	4,477	2,044	2,594	2,502	54,34	42,06	44,11
1/12	3,243	2,252	2,724	2,668	30,56	16,00	17,73
10/12	3,243	2,178	2,169	2,203	32,84	33,12	32,07
average	4,091	2,120	2,223	2,705	46,91	43,98	31,61
sd	0,655	0,477	0,617	0,853	14,43	19,01	26,84
min	3,243	1,381	1,307	1,479	21,43	9,21	-21,77
max	5,181	3,095	3,354	4,149	71,50	73,03	67,13

Date	PO4-P						
	mg/L				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	3,786	1,289	1,295	1,506	65,95	65,80	60,22
23/7	3,239	1,422	1,368	1,439	56,10	57,76	55,57
3/8	3,239	1,247	1,469	1,887	61,50	54,65	41,74
12/8	2,029	1,525	1,445	1,692	24,84	28,78	16,61
20/8	2,254	1,422	1,438	1,618	36,91	36,20	28,22
27/8	2,254	1,356	1,414	1,920	39,84	37,27	14,82
5/9	2,779	1,407	1,241	1,626	49,37	55,34	41,49
14/9	2,779	1,931	1,702	2,151	30,51	38,75	22,60
20/9	2,779	1,821	1,796	2,607	34,47	35,37	6,19
29/9	2,481	1,939	1,734	1,900	21,85	30,11	23,42
8/10	2,481	1,885	1,917	2,703	24,02	22,73	-8,95
14/10	2,111	1,851	2,368	2,886	12,32	-12,17	-36,71
20/10	2,111	1,787	2,067	2,925	15,35	2,08	-38,56
26/10	2,436	2,003	2,464	2,893	17,78	-1,15	-18,76

4/11	2,436	2,193	2,252	2,585	9,98	7,55	-6,12
10/11	2,273	1,889	2,220	2,393	16,89	2,33	-5,28
19/11	2,273	1,603	1,817	2,028	29,48	20,06	10,78
25/11	2,273	1,874	1,813	2,039	17,55	20,24	10,29
1/12	1,821	2,009	2,602	2,421	-10,32	-42,89	-32,95
10/12	1,821	1,829	1,774	1,727	-0,44	2,58	5,16
average	2,483	1,714	1,810	2,147	27,70	23,07	9,49
sd	0,498	0,278	0,408	0,493	19,85	26,80	28,50
min	1,821	1,247	1,241	1,439	-10,32	-42,89	-38,56
max	3,786	2,193	2,602	2,925	65,95	65,80	60,22

Date	pH			
	IN	G	P	C
15/7	6,91	7,57	7,41	7,64
23/7	6,98	7,71	7,69	7,94
3/8	6,98	7,6	7,45	7,82
12/8	7,31	7,51	7,72	8,11
20/8	7,35	7,69	7,61	8
27/8	7,35	7,99	8,08	8,26
5/9	7,34	7,74	8,02	8,1
14/9	7,34	7,36	7,75	8,04
20/9	7,34	7,7	7,9	8,19
29/9	7,05	7,39	7,61	7,84
8/10	7,05	7,1	7,84	7,74
14/10	7,3	7,07	7,54	7,75
20/10	7,3	7,06	7,65	7,95
26/10	7,28	6,87	7,24	7,92
4/11	7,28	6,95	7,45	7,93
10/11	7,24	6,83	7,26	8,02
19/11	7,24	6,85	7,36	7,83
25/11	7,24	6,85	7,29	7,88
1/12	7,34	7,19	7,53	8,06
10/12	7,34	6,95	7,34	7,81
average	7,23	7,30	7,59	7,94
sd	0,15	0,37	0,25	0,16
min	6,91	6,83	7,24	7,64
max	7,35	7,99	8,08	8,26

Date	EC (µS/cm)			
	IN	G	P	C
15/7	1227	1538	1061	4500
23/7	1156	1700	1150	4720
3/8	1156	1764	1397	4700
12/8	1358	2500	1860	4120
20/8	1169	2400	2010	3540
27/8	1169	2020	2350	2970
5/9	1189	1675	2220	1820
14/9	1189	1849	2410	1643
20/9	1189	1881	2620	1471
29/9	1039	1322	1735	1235
8/10	1039	1556	1947	1141
14/10	1112	1315	1375	1085
20/10	1112	1193	1411	983
26/10	1060	1048	1099	972
4/11	1060	1001	1218	961
10/11	1098	946	1121	976
19/11	1098	949	1016	986
25/11	1098	987	1023	1017
1/12	1012	1028	1084	1018
10/12	1012	948	955	896
average	1127	1481	1553	2038
sd	84	487	542	1446
min	1012	946	955	896
max	1358	2500	2620	4720

Date	TSS						
	mg/l				% removal		
	IN	G	P	C	G	P	C
15/7	73,33	18,67	20	16	74,54	72,73	78,18
23/7	54,67	28	30,67	20	48,78	43,90	63,42
3/8	54,67	33,3	26	46	39,09	52,44	15,86
12/8	91,6	9,33	22,67	19,33	89,81	75,25	78,90
20/8	170,67	24	20	12	85,94	88,28	92,97
27/8	170,67	2,67	10	18,67	98,44	94,14	89,06
5/9	208,33	6,67	4	9,33	96,80	98,08	95,52
14/9	208,33	4	14	20,7	98,08	93,28	90,06
20/9	208,33	0,67	5,3	5,3	99,68	97,46	97,46

29/9	152,31	38,67	34,67	52	74,61	77,24	65,86
8/10	152,31	16	12,67	52	89,50	91,68	65,86
14/10	98,67	5,5	26	38	94,43	73,65	61,49
20/10	98,67	13,3	16,67	45	86,52	83,11	54,39
26/10	260	30	89,33	32	88,46	65,64	87,69
4/11	260	4	6	60	98,46	97,69	76,92
10/11	81	6,7	5,3	35	91,73	93,46	56,79
19/11	81	8,7	7,3	30	89,26	90,99	62,96
25/11	81	4	5,3	13,3	95,06	93,46	83,58
1/12	110	14	13,3	23	87,27	87,91	79,09
10/12	110	4	7,33	15,33	96,36	93,34	86,06
average	136,28	13,61	18,83	28,15	86,14	83,19	74,11
sd	65,58	11,45	18,99	16,06	16,13	15,30	19,12
min	54,67	0,67	4,00	5,30	39,09	43,90	15,86
max	260,00	38,67	89,33	60,00	99,68	98,08	97,46